序言

地殻の変動が、大地震のときは勿論平時においても徐々に進行していることは、精密水準測量、基線測量、三角測量等の繰返し施行によって明かにされた。測量結果の綿密な解析から知られた地殻の様々の性質は最近の地震学に大きな貢献をした。特に、精密水準測量は、三角測量に比較して作業が簡単であり、しかも遥かに勝れた精度を以て測定できるので、必要な地域において再三その繰返し測量が行われており、今日では精密水準測量は地殻変動の検出には欠くことのできないものとなった。理想論から言えば、この精密水準測量を日本全域において、少なくも毎年1回繰返して行えば、日本の地殻変動の全貌が明かになり、且つ大地震に前駆する地殻変動の存在の有無を確めることができ、地震予知の問題にも大きな役割を果すことができるわけである。しかし、精密水準測量が三角測量に比べて作業が簡単であると言っても、これを広い範囲において絶えず繰返して行うことは、実際には経費の点からもなかなか容易なことではない。

そこで、一地点に何か器械を据付けることにより地殻変動を連続的に観測記録することが必要となる。この目的に副う一として、海岸地方では検潮儀がある。言うまでもなく、海水面は潮汐、海流、気圧、海水密度等の影響を受けるが、一年間程度の平均をとれば略一定の値を示し、これを基準として陸地の隆起、沈降を知ることができる。しかし今日ではなお未知な要素による海水面そのものの長期に亘る変動があるので、近接した地点に他の検潮儀を併置して比較する必要がある。将来多数の検潮儀が日本の沿岸に整備された暁には、この器械は海岸地方の地殻変動の検出に大きな役割を果すであろう。

陸地の内部においては、一地点において土地の隆起、沈降を直接測定記録することはできない。それで従来から、近接した二地点間の変位の差を測定する方法がとられている。土地の傾斜変化、土地の伸縮変化等

がそれである。このうち、土地の傾斜変化を記録するいわゆる傾斜計による観測例は今日まで多数あるが、その殆ど総ては水平振子を利用した傾斜計である。

しかし、今日まで行われた水平振子傾斜計による観測結果を見ると、その記録した永年変化の量は極めて大きく、一年間に数秒、十数秒角に達するものは珍らしくない。ところが、精密水準測量から知られた地殻の変動から土地の傾斜変化を算定してみると、そのように大きな値には決してならないのである。このことについては、筆者の一人が発表した「富士山麓に於ける地表傾斜変化の研究」（其の１）（震研彙報第２１号（昭和１８年））の序文中に詳しく述べてあるが、一例を挙げれば、昭和２１年１２月の南海地震に際して室戸半島は著しく南上りの傾動を示し、半島の突端においては９５ cm に達する土地隆起を生じたのであるが、地震後行われた精密水準測量の結果から半島の傾斜変化の量を算出して見ると６秒角に過ぎない[1]。また昭和５年伊豆伊東に発生した１日数百回に上る地震群に伴って土地が刻々に隆起していることが精密水準測量によって確められた。これなどは地殻変動が進行する速度としては最も大きい部類に属するが、この場合でも傾斜変化に換算すると、変動が最も急速であった１００日間に１秒角に達していないのである[2]。上の例は地震に伴って顕著な地殻変動が生じた場合であって、平時においては推して知るべしである。日本の太平洋岸の諸半島は平時において、南下りの変動が続行していることは、精密水準測量や南端部の検潮記録の結果から知られているが、その傾斜変化の量を調べて見ると、三浦半島年0.05秒、伊豆半島年0.11秒、紀伊半島年0.025秒、室戸半島年0.051秒の程度である。これから推して、平時進行している緩慢な地殻変動から期待される土地傾斜変化の量は、大きい場合でも年に0.1秒

---

1) 永田武、岡田惇：震研彙報第２５号（昭和２２年）８５頁。

2) 坪井忠二：震研彙報　第１１号（昭和８年）４８８頁。

角のオーダーであるといえる、ところが、水平振子傾斜計の観測が示す永年変化の量が年に数秒、十数秒角、或はそれ以上に達すると云うことは、この器械が示す傾斜変化というものが、地表の極めて局所的の変動であって、我々の求めている"地殻"の傾斜変化ではないというになる、

精密水準測量の規準となる標石は、地表に据付けられているが、二つの標石間の距離が充分長いということのために水平振子傾斜計において見られたる局部的の擾乱から免れているものと思われる、水平振子傾斜計の台の脚の間の距離を仮に30 cmとすると、この器械はこの30 cmという極めて短い距離の間の高低差を測っていることになるから、どうしても局部的の擾乱を受けてしまう、水準測量の標石間の距離は約2 Kmであるが、1秒角の傾斜変化は、2 Kmの距離に対して10 mmの高低差が生じたことに相当する、ところが、水平振子傾斜計においては、1秒角の傾斜変化は30 cmの距離に1.5ミクロンという微小の高低差を生じたことに相当する、

水平振子傾斜計が永年に亘る地殻の変動を測定することに失敗した条因は、このように極めて短い距離の間の高低差を測ることによるものである。そこで、筆者の一人は、かつて20 mの水管を筑波山腹の横坑中に設けて、その両端における水位の差をマイクロメーターにより読取ることを試み、数年間に亘って観測を続け、且つ従来の水平振子傾斜計との比較を行った[3] その結果、水管傾斜計の示す土地傾斜の永年変化は、5ケ年間に1秒角に達しないことが確められ、水平振子傾斜計に比べて遥かに信頼度が高いことが分った。

このように、地下適当の深さにおいて数十米の水管傾斜計を設置すれば、或る程度局所的の擾乱から免れ、精密水準測量に匹敵する信頼度を持った地殻変動の測定を行うことができる。ただ、場所を地下何米に選び、水管の長さを何米に選ぶべきかは、その場所の地質的條件にも依る

---

3) 萩原尊礼、震研彙報第25号(昭和22年)、27頁、

であろうし、これは今後の経験に待たなければならぬ。

一方、土地伸縮計については、かつて高橋博士[4]が油槽に浮かした15mの熔融水晶の棒を基準にして、両端の土地伸縮を測る装置を東京駒場に設置したことがあり、近頃では佐々博士が考案した25mの超不変鋼線を使用した装置がある。これ等の土地伸縮計は何れも十数米、二十数米を距てた二つの地点間の距離の変化を測定するものであるから、水管傾斜計と同じ行き方であって、この点水平振子傾斜計に見られるような土地の局部的擾乱を受けることは少ない。

今回筆者等は三浦半島油壺において地殻変動の研究に従事する機会を得た。こゝには東大理学部の臨海実験所の施設があり、また戦時中作られた良好な横坑があって、地殻変動測定用の器械を据付けて試験するには好条件を備えている。また、こゝには地理調査所の検潮儀が設置されており、こゝの平均海水面は我国水準原点の標高を定める基準となっている関係から、三浦半島には水準線路が設けられていて屡々精密水準測量が行われている。このため、三浦半島の地殻変動の進行状態は或る程度まで知られているので、新しい地殻変動の観測器械を設置して試験するには好都合である。

筆者等は先ず、臨海実験所本館附近の横坑内において、水管傾斜計、水晶管による土地伸縮計及び比較のため従来の水平振子傾斜計を設置した。後になって、超不変鋼線による土伸縮計も設置された。要は、各種の新しい測定器を設置して観測を続け、信頼するに足り、且つ普及性を持った地殻変動の器械観測法を確立しようとするものである。研究の第一の目標は地殻の永年変化であるが、測定箇所が海岸に近いため潮汐荷重による土地の傾斜、伸縮が明瞭に記録される結果、これは新しい測定器械の良否を速断するのに大変役立っている。また潮汐荷重による土地変形を、傾斜変化、伸縮変化の両面から取扱って見た結果は、土地の物

4) 高橋竜太郎、震研彙報第12号(昭和9年)、760頁

理的性質について色々の問題が提出された。

以下章を逐って、測定器械、観測、観測結果に対する考察等について述べる。この研究は、更に長年月続けられて始めて結果らしい結果が出る性質のものであるが、こゝに一年間の成果をまとめて、速報とし諸賢のご批判をあおぎ大過なきを期する次第である。

なお、昭和２３年６月９日に開催された第７回地震予知研究連絡委員会において三浦半島に各機関による各種の観測を集中するよう申合せが行われたが、筆者等の研究がその共同観測の一翼を担うことになり得れば幸である。

本研究は、主として文部省科学研究費によるものである。また、油壷臨海実験所の故菊地健三教授他所員の方々には常に非常なお世話になった。こゝに厚く感謝を捧げる次第である。

第１章　観測器械

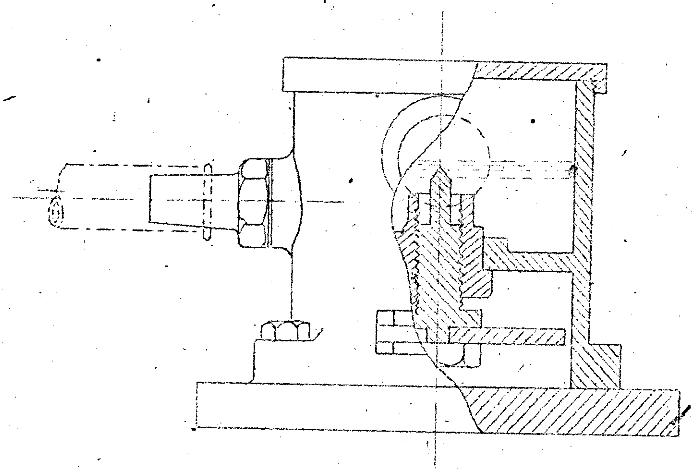
1. 水管傾斜計

(i) 水管傾斜計

水管を使って、その両端の水位の差から土地の傾斜変化を測定する装置は古くは Michelson の傾斜計があり、これと同じ型のものが地震研究所にも据付けられて観測されたことがあるが[1]、石本博士によりシリカ製の水平振子傾斜計が考案されるに及んで専らこの器械による観測が盛になったため、水管傾斜計は一時全く省られなくなった。しかし、十余年間に亘る観測の経験から、前に述べたように地殻の緩慢な変動を観測するには水平振子傾斜計は不適当であることが判明したので、再び水管傾斜計の研究が取上げられるようになった。筆者の一人は数年前、震研筑波山支所構内に設けられた横坑内に２０米の水管傾斜計を据付け

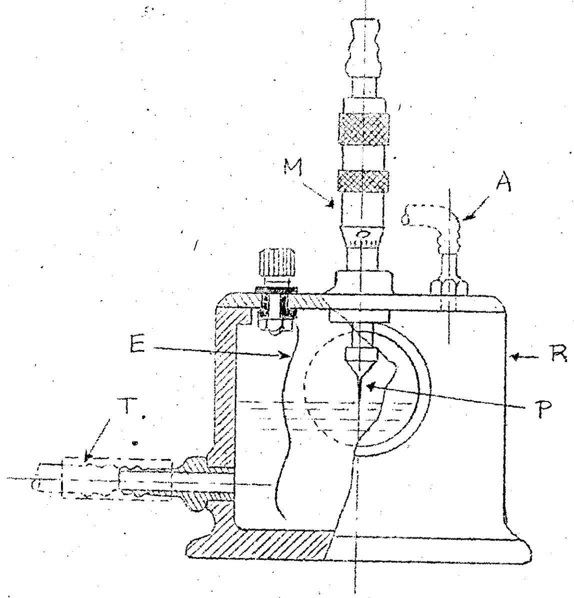
1) 高橋竜太郎、震研彙報第８号（昭和５年）１４３頁

て今日まで観測を続け好成績を得た[2)]。この器械は、従来の水管傾斜計が太い鉄管を使用したのに対し、両端の容器の間を細い硝子管で結ぎ、装置を頗る簡単にして普及性を持たせたのが特色である。この傾斜計では両端の容器中の水位の読取りは、容器の下部に取付けられたマイクロメーターのスピンドルの先端が水面に接するのを検微鏡によって判定するようになっている。便宜上、この器械をA型水管傾斜計と呼ぶことにする。



第1図　A型水管傾斜計

その後、マイクロメーターに市販のものを使用することを試み、これを水面の上部に取付け、マイクロメーターの先端が水面に触れた瞬間、電気回路が閉じられネオンランプが点ずるようにした。この方法によれば、読取の操作は大変に楽になる。この装置は、南海地震後室戸町において使用



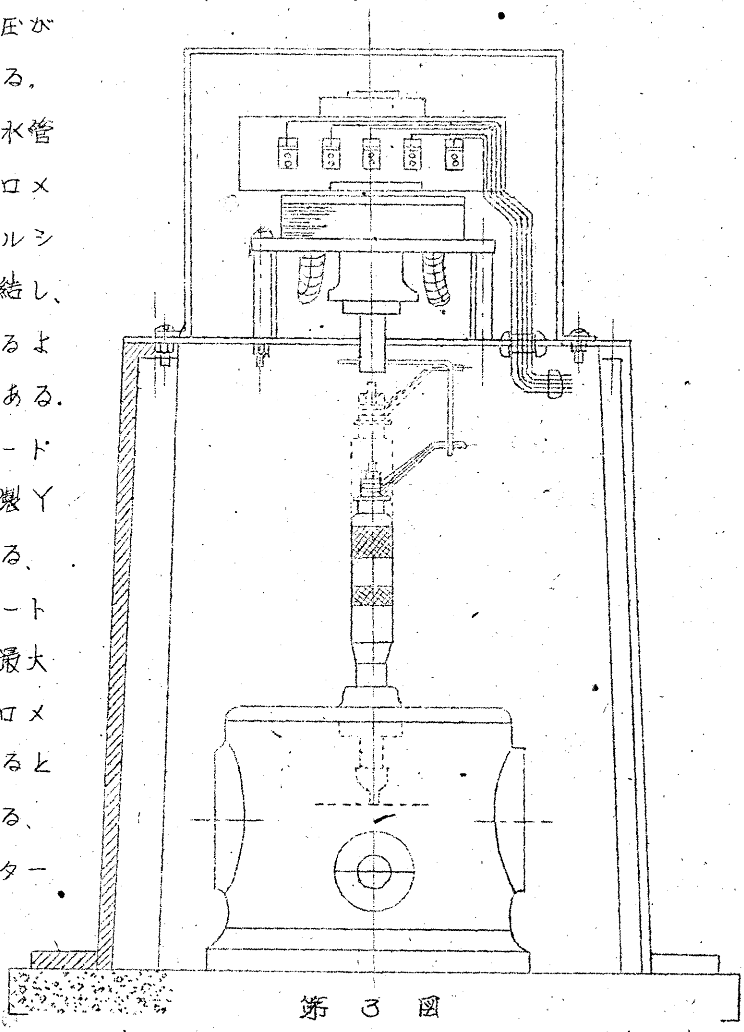
第2図　B型水管傾斜計

2）萩原尊礼、震研彙報第25号（昭和22年）27頁

し好い結果を得た[3]ので、第2図に示すような装置に仕上げた。これをB型水管傾斜計と呼ぶことにする、図において、Rは水を満す容器、Tは硝子管、Mはマイクロメーター、Pは白金製先端、Eは電極である。Aはゴム管であって、坑内に一定の通風がある場合などは、両端の容器に気圧差を生じて水位に影響を与えることがあるので、このようなとき両容器をこのゴム管で繋ぎ、容器の内部をエアータイトとして両容器の水面に加わる気圧が等しいようにする。

第3図はB型水管傾斜計のマイクロメーターに小型セルシンモートルを連結し、遠隔読取が出来るようにしたものである。今回使用したモートルは、北辰電機製YM－14型である、試験の結果、モートルの追従誤差は最大約2°で、マイクロメーターに換算すると3/1000 mmである、

マイクロメーター



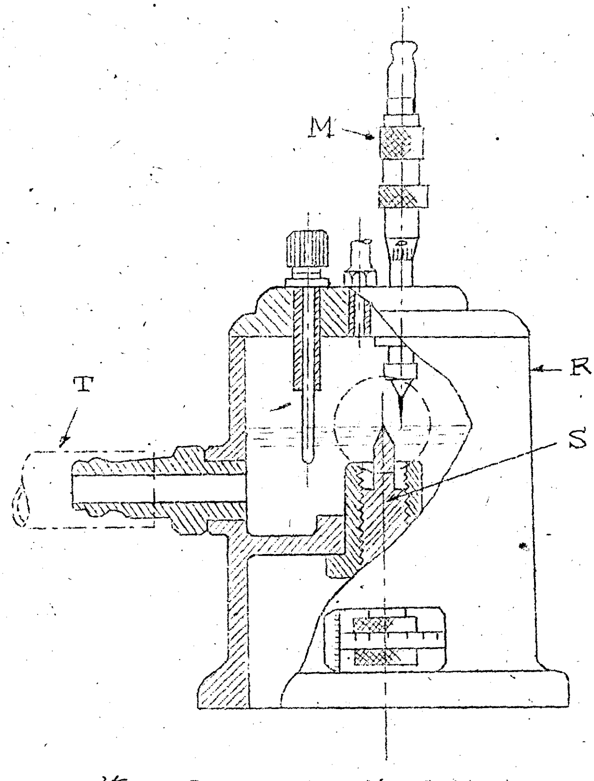
第 3 図

セルシンモートルによるB型水管傾斜計遠隔読取

3) 萩原尊礼、山田重平、震研速報第5号(昭和22年)179頁

の先端が水面に接することを判別するために、100Vのネオンランプが点ずるようになっているが、先端が水面に接したときネオンランプに流れる電流は約1.3mAである。実験室において、白金製先端を水面に接触させたり離したりすることを、自働的に約4万回行って見たが、この結果は顕微鏡にて先端の変形を認めなかつた、しかし、実際油壷において約一ケ年観測した結果は、4個のマイクロメーター中2個が、先端が電流によって浸蝕された、

これは恐らく白金中に不純物が含まれていたものと解釈されるが、このようなことが起ると観測結果が不正になるので、B型の装置を改造し、第4図に示すようにA型とB型とを併置したような装置を作った。図でRは容器、Tは硝子管である、Sは水中に設けたマイクロメーターでこの先端が水面に接するところを顕微鏡で読取る。Mは電気的な方法で水面に接したことを識別するためのマイクロメーターである、遠隔操作用にはMのマイクロメーターを使用し、随時Sのマイクロメーターにて直読してチエックをするのである、この装置をC型水管傾斜計と呼ぶことにする。



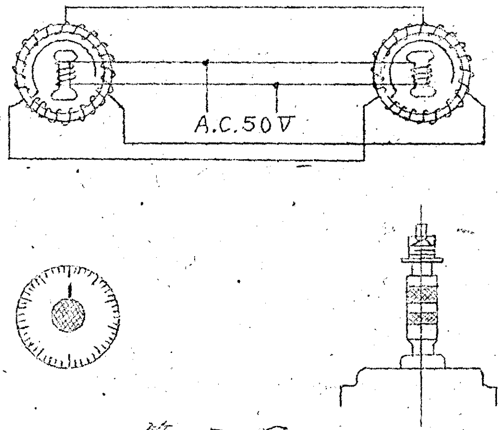
第4図　C型水管傾斜計

(ii) 水管傾斜計遠隔測定装置

水管傾斜計の両端の水位を読みとるために、観測者が数十米の距離を往復するのは実際にあたつて不便である。また密閉した坑内に於て観測

者が急速に移動するための気圧の変化が水位に影響を及ぼすことも実際に経験されることであるので、遠隔読取を行うことが望ましい。

すでにのべたように、筆者等はセルシンモートルを利用することにより遠隔測定装置を考案した。第5図に模式的に示すように、水位を測定するマイクロメーターはその上に取りつけられたセルシンモーターによって廻転させられる、このセルシンモーターは別のセルシンモーターによって遠い場所に於て自由に廻転さすことが出来る、かくして測定場所にネオンランプを備えれば、マイクロメーターの尖端が水面に達した瞬間に読み取りを行うことが出来る。



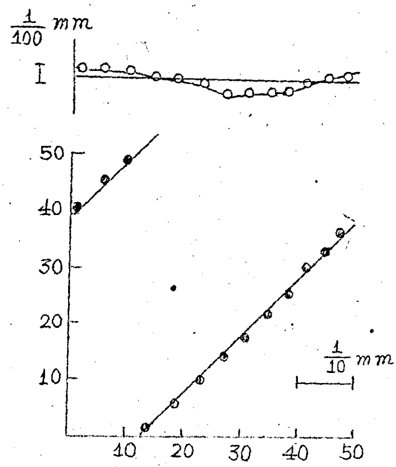
第 5 図

セルシンモーターは回路抵抗が10オーム程度である時は、最大100糎瓦程度のトルクを出し得るから、マイクロメーターを廻転さすことは容易であり、発信セルシンのダイヤルを徐々に廻転すれば全く遅れを生ずることなくマイクロメーターを廻転さすことが出来る。

セルシンモーターはそれ自身最大約2°の誤差をもっているが、セルシンモーターの一廻転に対してマイクロメーターは0.5 mmすすむのであるから、この遠隔操作のためにマイクロメーターは最大約3/1000 mmの誤差をもつことになる。この量は普通級のマイクロメーターの誤差の程度であり、長さ10m以上の水管傾斜計に於いて0.1秒の変化を正確に測定することを目的とする場合はほゞ無視出来る。

この装置の較正試験として、次のようなことを行った。両端の水槽をならべておき、2～3滴ずつ水を加えて行き、両方のセルシンモーターの読みの増減の仕方をしらべた。その1例は第6図に示してあるように、おのおのの読みを両軸にとったグラフ上においては測定値はほとんど

45°の直線上にのり、1/1000 mm の桁に於いて若干のばらつきがある。直線と測定値の差を拡大して画いた図をみると、この差は角度に対してほゞ正弦的に変化しており、較正の結果より常数を定めて補正を実行することにより1/1000 mm 以内の誤差にて遠隔測定を行うことが可能である。しかし実際の場合には補正を加えずとも0.1秒の正確度を保持することが可能であるので、かかる操作は現在の状態に於ては不必要である。



第6図

セルシンモーターはその構造が極めて簡単であり、またすでに古から実用化されているものであるから、故障のおそれはほとんどなく、油壷に装置して以来遠隔測定装置の故障は現在迄で全くない。

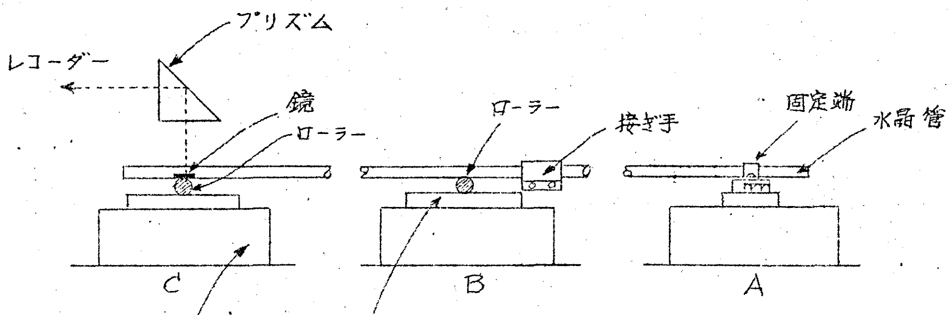
2. 水晶管土地伸縮計

(i) 長期観測用水平型伸縮計

構造　こゝに述べる伸縮計はいずれも熔融水晶管の長さを規準として、土地に固定した二つのコンクリートブロック間の距離の変化を測定する装置である。水晶管の一端を一方のブロックに固定すれば、土地の伸縮は水晶管の他端と、もう一方のブロックとの相対的な動きで示されるから、之を適当に拡大して記録すればよい。嘗って同じ原理に基いた伸縮計を高橋博士が試作したが[4]、以下に述べるものは更に簡便な構造をもち、又十分実用になることをたしかめられたものである。その概略は第7図に示される。

水晶管は外径7 mm、長さ1 mのものを燐青銅製の接ぎ手により所要

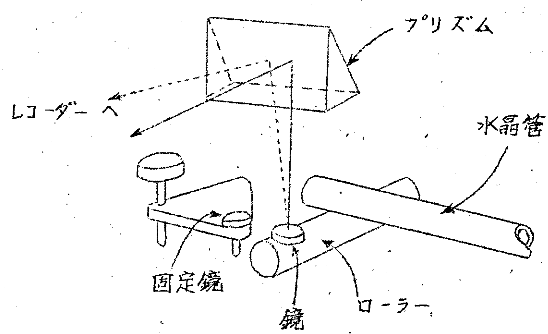
4) 高橋龍太郎、震研彙報第12号(昭和9年)760頁



第 7 図

の長さ（8～25 m）に連結し、その一端がインバール製の金具によりブロックAに固定されている。ブロックBは上面にガラス板が置かれ、その上にのせられたローラーにより水晶管の途中を支えているもので、1 m間隔に設けられている。ブロックCは拡大記録装置を有するもので、水晶管の終端とこのブロックの相対的な動きはローラーの回転に換えられる。ローラーは直径7 mm弱の真鍮製で各々公差1/200 mmに仕上げてあり、その微小な回転は光挺子式に拡大され、プリズムによって水平方向のふれに換えられた上、印画紙に記録される。このプリズムは水平及び垂直軸のまわりに微小回転出来るようになっていて、光点の位置調節の便宜を計っている。第8図はこれらの配置を示すもので、固定鏡は印画紙上に基線を描く。

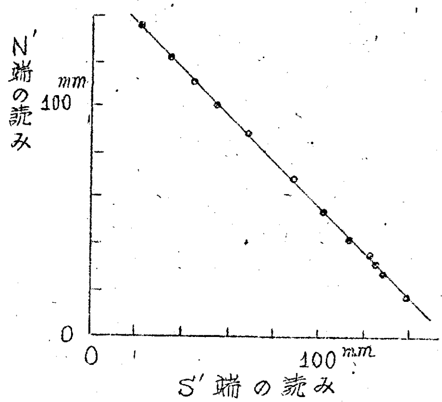
コンクリートブロックの寸法はA及びCが20 cm角、Bが15 cm角で、設置後相当日数がたち、充分枯れてから使用する。現在この型式のものは三台設けられているが、その位置及び設置状態は第18図、写真2を参照されたい。



第 8 図

機能試験　燐青銅の接ぎ手で連結された水晶管が全体として剛体的に依動するかという点を確めるため、据付に当って簡単な試験を行って見

た。水晶管の両端を自由にしたまゝ同一直径のローラーに載せ同一倍率の光梃子により夫々動きを読取ることにした。第9図はその結果であって、伸縮計の一つ、N'S'方向のものに対する試験である。黒点は、このように設置した水晶管を微小な範囲で数回往復させた場合、スケール上の光点の読みであって、殆んど完全に直線上に乗っている。このことから見て水晶管を連結した部分の機械的安定性については信頼がおけると思われるし、又拡大機構の動作が円滑な事も判る。



第 9 図

次に温度変化の影響を考えるに、水晶管、燐青銅の線膨脹係数は夫々0.5×10^{-6}, 2×10^{-5}程度である。従って純然たる熱膨脹のみ考えるならば、伸縮計全体としての温度1°Cの上昇に対する伸長量は10^{-6}以下であり、壕内の温度の日変化振巾がその数分の1であることを考えれば、10^{-6}の何倍かに達する短期変動を取扱う上には一応問題ない。

しかし長期に亘る変動観測の場合は、温度の変化範囲も広くその影響分の分離も困難であって、それに対する考察は第3章で行うことにする。

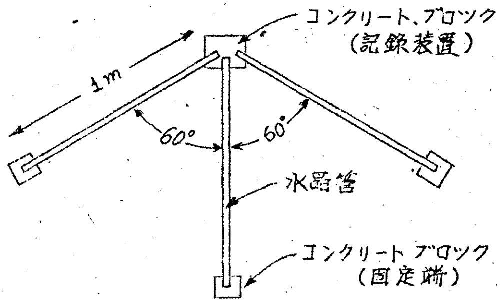
(ii) 小型三成分伸縮計

構造　土地の歪の状態を運動学的に表現するには、二次元の場合、三つの異なる方向の伸縮量があればよい。前節で述べた伸縮計もその意味で三方向に設けてあるが、何分大がかりなものである。この欠点を補い移動観測にも用いる目的で試作したのが以下に述べる伸縮計である。

原理的には前者と別段異ならないが、スパンが1mにとってあること、互に60°ずつ開いた三組の伸縮計を一台にまとめてあり、同一紙上に記録する為光学系が若干複雑になっている点等が相違している。

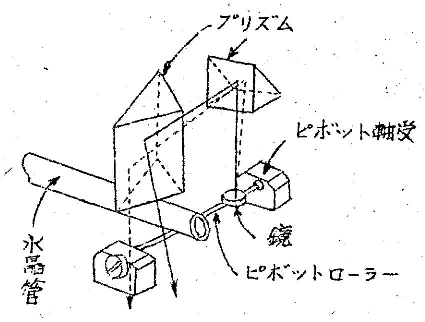
ブロックの配置は第10図の通りであって、用いる水晶管も前と同じ

であるが、倍率が大きい為にローラーと接触する部分は一層滑らかな水晶管を使っている。前の型の倍率は約300であったが、1mのスパンでこれと同程度に土地の伸縮を記録する為には約2000倍の倍率を必要とする。



第 10 図

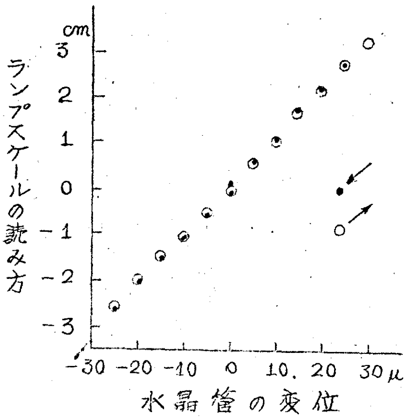
その為ローラーには直径2.0mm(公差0.01mm)の鋼線のピボットしたものを用いる。装置の主要部はこのピボットローラーを水平位置に配置した台板と、大小6ケのプリズム及び固定鏡を有するプリズム台からなる。これらの模様は写真3に見られるが、三ケのローラーの回転から生じた光線のふれは一旦夫々のプリズムによって水平な向きに直された上、次のプリズムで平行に揃えられる(第11図参照)。写真に見られる調節ねぢは之等のプリズムを微動させるもので、装置を設置後4ケの光点(固定鏡によるものを含む)を印画紙上適当な位置に配列するに用いる。主要部をのせるブロックは18cm角であり、固定端となる三つのブロックは之より小さい。



第 11 図

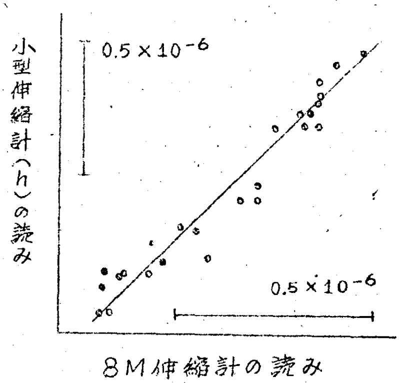
機能試験　ピボットローラーの動きが完全に土地伸縮を表わすか否かの点について試験を行うた。その方法はマイクロメーターを利用して水晶管を微小変位させ、それによって擦られるピボットの回転を光梃子式に読取って見た。第12図はその結果の一例であって、あるピボットローラーの動きを1mの光梃子で拡大した場合を示す。水晶管はそれ自体の重みだけでローラーに接触しているのであるが、上の試験の結果では滑りは全く認められず、ローラーの回転も略々円滑である。尚ローラー

に触れる水晶管の表面が普通のものと、更に滑らかなものとの場合を比較して見たが、後者の方が無難なようである。依って実地には後者を用いることとし、この場合に対する動作試験から三ケのピボットの実倍率を求めて見ると1700乃至1800倍であることが判った。この値はローラー毎に固有のもので、水晶管の触れる位置には殆ど関係しない。



第12図

以上の試験からピボットローラーの動作には欠陥がなく、高倍率伸縮計用として用いられることが判る。次に試験すべき点は、実際に記録される土地の伸縮が、前節の大型伸縮計によるものと同一であるか否かということである。この問題は次章でも採上げられるが、観測壕内で行った試験の結果は第13図の通りである。比較されたのは余り長くない(半日乃至1日程度)の週期の、N25°W方向の土地伸縮である。図より判る通りこの試験の結果は大体満足すべきものであって[5]、少くとも短い期間では、小型伸縮計の記録を大型伸縮計のそれと同一に考えて差支えない。この伸縮計は今尚観測壕の一隅で試験観測を続けて居り（第26図参照）、やがては油壷附近の各地点を移動観測する予定である。



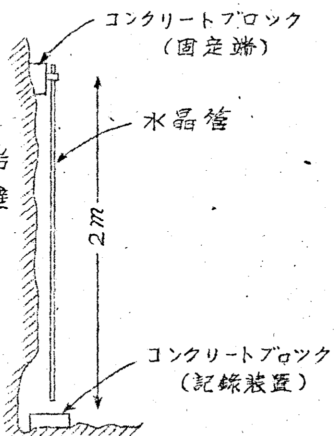
第13図

---

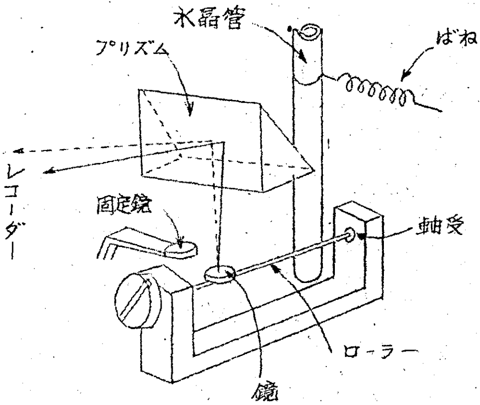
5) 同図に見られる多少のばらつきの多くは位相及び振巾の読取り誤差によるものと思われる。

(iii) 鉛直型伸縮計

構造　前述の伸縮計はいずれも水平方向の土地伸縮を対象とするものであったが、次に述べるのは土地の鉛直方向の伸縮を観測しようとするものである。原理的には前二者と同一であって、第14図のように設けられたブロックAに水晶管の一端を固定して垂下らせ、下の端とブロックBとの動きを第15図のような機構によって拡大記録させるものである。スパンは2.0mにとり、ピボットローラーは直径2.0mm、使用す



第14図

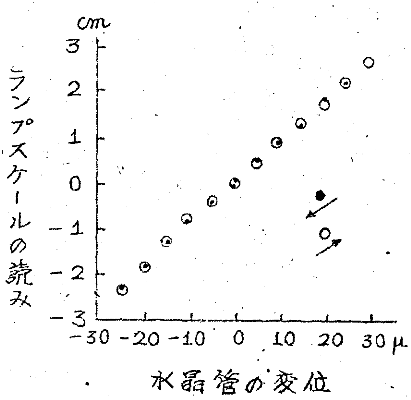


第15図

る水晶管は前と同種のものを弱いばねでローラーに軽く接触させている。

機能試験　ピボットローラーの動作については(ii)の場合と同じ装置によって試験を行った。第16図はその結果であって、ピボットに異常のないことが確かめられる。又倍率を同図から求めると1mの光梃子に対して2100倍となる。

実際に観測を行っている位置は第26図を参照されたいが、同処で得られた記録の一例が写真5に示されている。



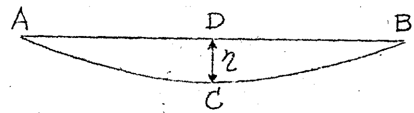
第16図

尚温度変化に対しては特に試験を行ってないが、構造の類似から見て(i)の場合の考察が大体適用されるであろう。

3. 超不変鋼線土地伸縮計

適当な距離の間に超不変鋼線(*Super-invar wire*)を張って、これを基準にして土地の伸縮を測定することは、既に佐々博士等により行われてる。この方法によれば、水晶管土地伸縮計のように、水晶管を支えるためのコンクリート柱を等間隔に何本も設ける必要がなく、この点頗る簡単であるが、鋼線に大きな張力が働き続けるので、長期変動の観測では、材料の偏固現象が問題になる。筆者等は今回、25mの超不変鋼線土地伸縮計を製作したが、これを油壷における25m水晶管土地伸縮計と併べて設置し、両種の伸縮計の利害得失を吟味することとした。

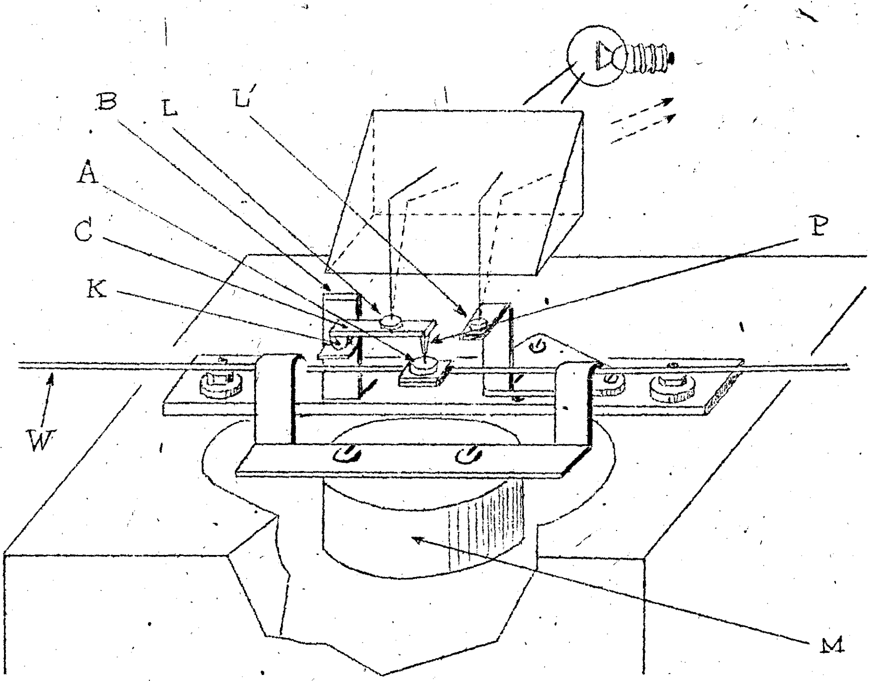
今回製作した超不変鋼線土地伸縮計の原理は第17図のように鋼線の両端A,Bをコンクリート・ブロックに固定し、鋼線にCDなる僅かの弛みを持たせておく。もし固定点AB間の距離が土地の伸縮により増減すれば、それに相当して弛みCDの長さは増減する。従ってC点の上下の変化を拡大して記録すれば、土地伸縮を記録できることになる。



第17図

実際に鋼線の中央点Cの上下運動を拡大するには第18図のような方法をとった。図において、Aは鋼線の中央部に取付けた小さな金具、Bは大地に固定された金具である。Cはナイフ・エッジKとピボットPからなる一種の振子で、NはBの上に、PはAの上に乗る。Cにはレンズ鏡Lが付けてある。鋼線の中央の上下の動きにより、振子Cは回転し、従って鏡Lが回転する。この鏡の回転を利用し、光振子の方法で感光紙にCの上下の変動を記録する。

今回使用した超不変鋼線は、昭和23年度における文部省科学試験研究(標準尺用不変鋼の製造)によって試作された材料の一部であって、



W 鋼線、 A 鋼線に取附けた小金具、 B 大地に固定された金具、 C 振子、 K ナイフ・エッジ、 P ピボット、 L レンズ鏡、 L′ 固定鏡、 M 錘

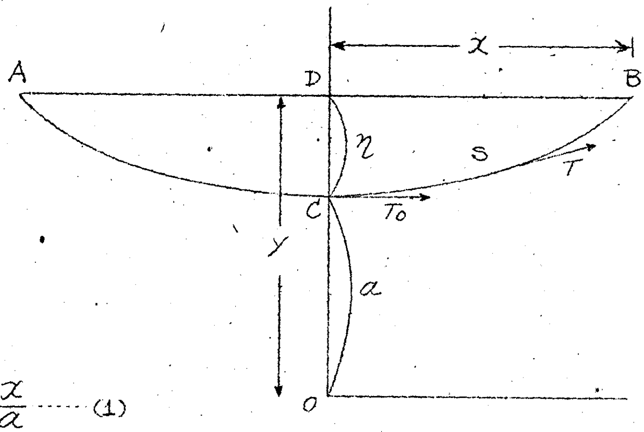
第18図 超不変鋼線土地伸縮計の拡大記録装置

鋼線そのものの物理的諸性質は現在各研究担当者によって試験されているので、別の機会に発表される筈であるが、こゝに必要な諸常数を掲げれば次の通りである。

成分	Fe 62.5% Ni 34% Co 3.5%
線膨脹係数	0.3×10^{-6} より小（精密測定は未了）
密度	7.8
ヤング率(E)	12×10^{11} c.g.s
鋼線外径	1.7 mm
鋼線線密度(σ)	0.177 gr/cm
鋼線断面積(A)	0.0227 cm²

次に鋼線伸縮計において、土地の伸縮が線の弛みにどのような変化を

與えるかを調べて見る、第19図においてACBを鋼線とする、先ず、Cには錘を附けない場合を考える、図のように、座標軸を選べば、線の依る懸垂線（Catenary）は次式で表される。


第 19 図

$$y = a\cosh\frac{x}{a} \cdots\cdots (1)$$

$$S = a\sinh\frac{x}{a} \cdots\cdots (2)$$

$$\eta = y - a = a\left(\cosh\frac{x}{a} - 1\right) \cdots\cdots (3)$$

こゝに、 $a = \dfrac{T_0}{\sigma g}$

であって、T_0 は鋼線の水平張力、σ は鋼線の線密度である。

いま、x が $x+dx$ に変化したとき、η は $\eta+d\eta$ になるものとする、このとき、鋼線の張力変化及び伸縮によって T_0 及び σ が変化するので、a は $a+da$ に変化する。張力変化により鋼線の長さ S は変化するが、鋼線の弛みが余り大きくない限り充分な近似において $T = T_0$ と考えることができるから、

$$S = S_0\left(1+\frac{T_0}{EA}\right) = S_0(1+ka) \cdots\cdots (4)$$

但し、 $$k = \frac{\sigma g}{EA} \cdots\cdots (5)$$

と書くことができる、S_0 は張力零のときの鋼線の長さ、E はヤング率、A は鋼線の断面積である。S_0 は温度一定ならば常数であるが、温度変化を考慮に入れゝば S_0 は S_0+dS_0 になる、k は σ, A, E 等の変化に伴って変るが、このうち温度変化による E の変化のみが大きい影響を持ち、後に分るように σ, A は一応常数と見てよい、そこで、k は $k+dk$

に変化するものとすると、dk と dE の間には $dk/k=-dE/E$ の関係がある。さて、(2)と(4)より、

$$S_0(1+ka)=a\sinh\frac{x}{a}\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(2')$$

となる。そこで(2')及(3)について夫々全微分を採れば、

$$(1+ka)dS_0+S_0k\,da+S_0a\,dk$$

$$=\left(\sinh\frac{x}{a}-\frac{x}{a}\cosh\frac{x}{a}\right)da+\cosh\frac{x}{a}dx\cdots\cdots(6)$$

$$d\eta=\left(\cosh\frac{x}{a}-1-\frac{x}{a}\sinh\frac{x}{a}\right)da+\sinh\frac{x}{a}dx\cdots\cdots(7)$$

上の二式から da を消去すれば、

$$d\eta=\frac{\left[-\cosh\frac{x}{a}dx+(1+ka)dS_0+S_0a\,dk\right]\left(\cosh\frac{x}{a}-1-\frac{x}{a}\sinh\frac{x}{a}\right)}{\sinh\frac{x}{a}-\frac{x}{a}\cosh\frac{x}{a}-S_0k}$$

$$+\sinh\frac{x}{a}dx\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(8)$$

となる。この式は $dx,\ dS_0,\ dk$ と $d\eta$ との間の関係を与える。もし、鋼線の弛みが小さく、

$$\eta\ll x\quad ならば\quad x\ll a$$

であって、第一近似として(3)により、

$$\frac{a}{x}\approx\frac{x}{2\eta}$$

となる。また1に比べて ka は小さい。従って(8)の高次の項を省略すれば、

$$d\eta\approx-\frac{3}{2}\frac{a}{x}\frac{1}{1+3\left(\frac{a}{x}\right)^3S_0k}(dx-dS_0-S_0a\,dk)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(9)$$

$$\approx-\frac{3}{4}\frac{x}{\eta}\frac{1}{1+\frac{3}{8}\left(\frac{x}{\eta}\right)^3S_0k}\left(dx-dS_0+\Delta S_0\frac{dE}{E}\right)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(10)$$

となる。こゝに、$\Delta S_0=S_0ka$ であって、使用状態における S_0 の伸びである。もし $E=\infty$ ならば $k=0$、従って、

$$d\eta=-\frac{3}{4}\frac{x}{\eta}(dx-dS_0)\quad\cdots\cdots\cdots\cdots(11)$$

である。

先に、(5)のσ, Aを常数と見做したが、実はσ, Aは鋼線の長さや張力の変化に伴って複雑な変化をするわけである、しかし、そのオーダーを当って見ると、$d\sigma/\sigma$もdA/Aも共にdS_0/S_0或はdx/S_0のオーダーである、ところで

$$\frac{dk}{k} = \frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{dA}{A} - \frac{dE}{E}$$

であるから、(9)の右辺のカッコの中は

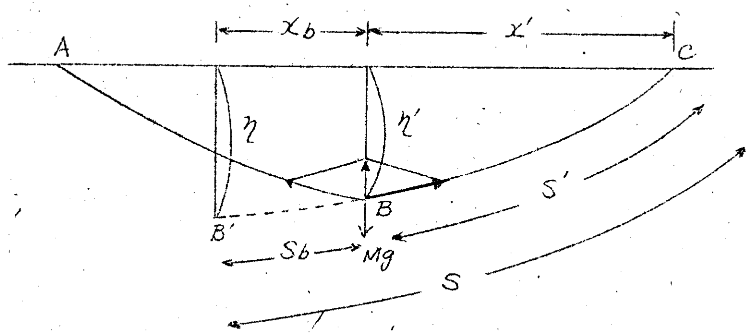
$$dx - dS_0 - \Delta S_0 \frac{dk}{k} = dx - dS_0 - \Delta S_0 \left(\frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{dA}{A} - \frac{dE}{E} \right)$$

となる、これをS_0で割れば

$$\frac{dx}{S_0} + \frac{dS_0}{S_0} - \frac{\Delta S_0}{S_0} \left(\frac{d\sigma}{\sigma} - \frac{dA}{A} - \frac{dE}{E} \right)$$

となる、$\Delta S_0/S_0$は小さい量で実際には10^{-3}のオーダーであるから、dS_0/S_0に比べて$\frac{\Delta S_0}{S_0}\frac{d\sigma}{\sigma}$, $\frac{\Delta S_0}{S_0}\frac{dA}{A}$は省略できる、従って、$\sigma$, Aの変化を考えなくても、その影響は無視できる、しかし、温度変化1℃に対し、dE/Eは10^{-4}のオーダーであり、dS_0/S_0及びdx/S_0は10^{-6}〜10^{-7}のホーダーであるから、温度変化が大きいときは$\frac{dE}{E}$は無視できない。

次に、鋼線の中央に錘Mを取附けた場合を考えてみる、第20図にお



第 20 図

いて、ABCを錘Mを取附けた場合の懸垂線とする、いま、錘のない一つの自由懸垂線B'BCを考え、その最下部がB'であるとする、そして、この自由懸垂曲線のB点における張力の鉛直成分が、丁度 $Mg/2$ であるとすると、BCの部分の懸垂曲線は全く、BにMなる錘を附けたときの懸垂曲線と一致する、AC間の距離を $2x'$、鋼線の長さを S' とし、図のように x_b, S_b を取り、仮想懸垂曲線のB'B部分の釣合（力の鉛直成分）を考えれば、

$$\frac{Mg}{2} = \sigma g S_b = \sigma g a \sinh\frac{x_b}{a} \quad \cdots\cdots (12)$$

従って、

$$S' = S - S_b = S - \frac{M}{2\sigma}$$

$$= a \sinh\frac{x_b + x'}{a} - \frac{M}{2\sigma} \quad \cdots\cdots (13)$$

$$\eta' = a\left(\cosh\frac{x_b + x'}{a} - \cosh\frac{x_b}{a}\right) \quad \cdots\cdots (14)$$

となる、こゝで、x' が $x' + dx'$ に変化した場合を考えると、x_b は $x_b + dx_b$ に、η' は $\eta' + d\eta'$ に、a は $a + da$ に、変化する、前と同様に、

$$S' = S_0(1 + ka) \qquad 但し \quad k = \frac{\sigma g}{EA} \quad \cdots\cdots (15)$$

とおけば、S_0 は温度変化により $S_0 + dS_0$ に変化し、k は温度変化によるEの変化に伴い $k + dk$ に変化する、従って、(13)は

$$S_0(1 + ka) = a \sinh\frac{x_b + x'}{a} - \frac{M}{2\sigma} \quad \cdots\cdots (16)$$

となる、前と全く同様に(12), (16), (14)の全微分を取り、da, dx_b を消去すれば、

$$d\eta' = \frac{\left(-\cosh\frac{x_b + x'}{a}dx' + (1 + ka)dS_0 + S_0 a\,dk\right)\left(\cosh\frac{x'}{a} - 1 - \frac{x'}{a}\sinh\frac{x_b + x'}{a}\cosh\frac{x_b}{a}\right)}{\sinh\frac{x'}{a} - \frac{x'}{a}\cosh\frac{x_b + x'}{a}\cosh\frac{x_b}{a} - S_0 k \cosh\frac{x_b}{a}}$$

$$+ \sinh\frac{x_b + x'}{a}\,dx \quad \cdots\cdots (17)$$

鋼線の弛みが小であれば、$x_b \ll a$, $x' \ll a$ であって、

$$x_b \approx \frac{M}{2\sigma},$$

$$\frac{a}{x'} \approx \frac{x'}{2\eta'}\left(1+\frac{M}{\sigma x'}\right)$$

となる、従って前の場合と同様に(17)の高次の項を省略すれば、

$$d\eta' = -\frac{\frac{3}{2}\frac{a}{x'}\left(1+\frac{M}{\sigma x'}\right)}{1+\frac{3}{2}\frac{M}{\sigma x'}+\frac{3}{4}\left(\frac{M}{\sigma x'}\right)^2+3\left(\frac{a}{x'}\right)^3 S_0 k}(dx'-dS_0-S_0 a\,dk)$$

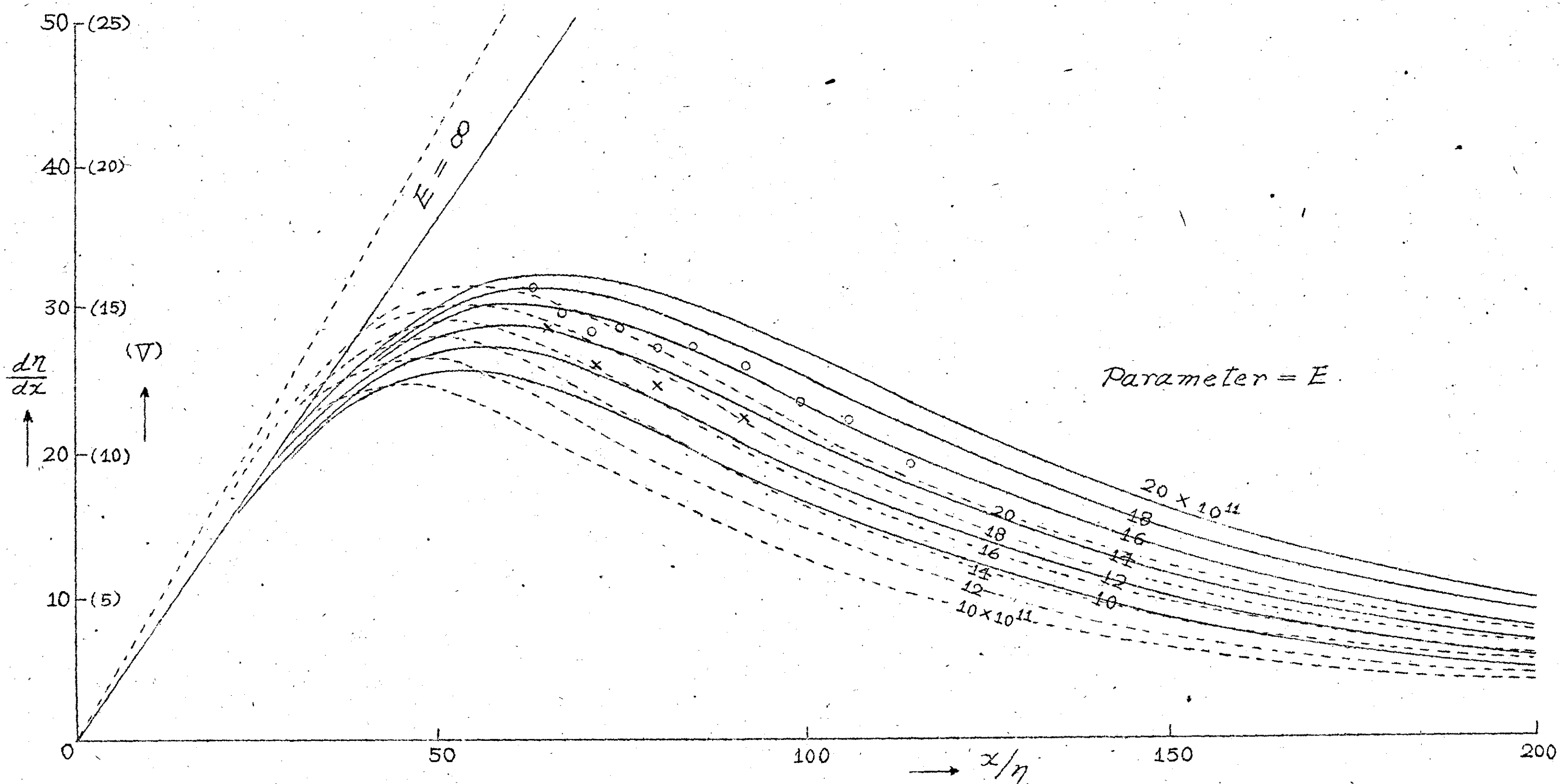
$$= -\frac{\frac{3}{4}\frac{x'}{\eta'}\left(1+\frac{M}{\sigma x'}\right)^2}{1+\frac{3}{2}\frac{M}{\sigma x'}+\frac{3}{4}\left(\frac{M}{\sigma x'}\right)^2+\frac{3}{8}\left(\frac{x'}{\eta'}\right)^3\left(1+\frac{M}{\sigma x'}\right)^3 S_0 k}\Big(dx'-dS_0$$

$$+\Delta S_0\frac{dE}{E}\Big) \qquad \cdots\cdots (18)$$

となる、

第21図の実線は(10)式の dx の係数を計算したもので、鋼線のヤング率Eをパラメーターとしてある。仝図の破線は $M = 100\,gr$ の場合につき、(18)の dx' の係数を計算したものである。鋼線の常数としてはEの他は上記の超不変鋼線の値を採ってある。

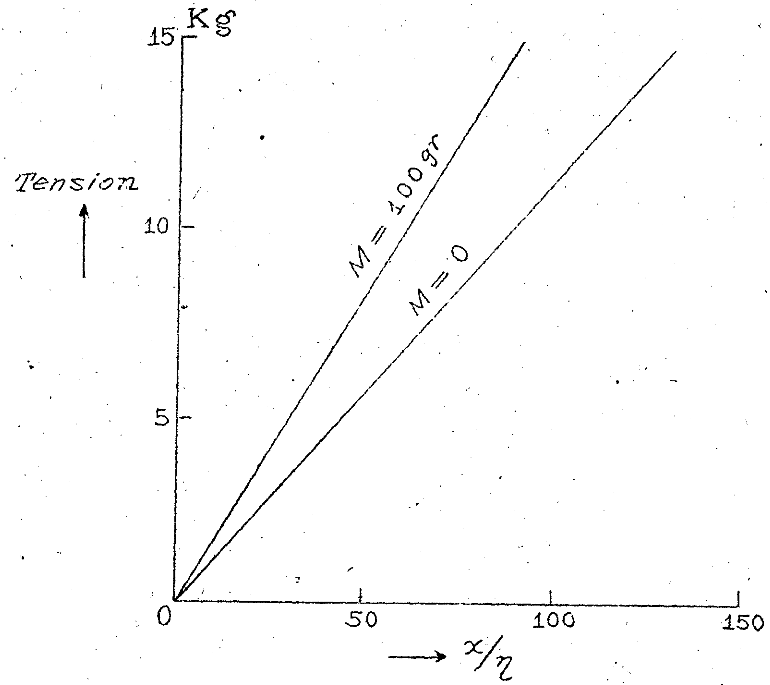
張力による鋼線の伸びを考慮に入れないで単に幾何学的の考えからいうと、図の $E=\infty$ の線を見れば判るように、線の弛みを小さくするほど、即ち x/η (又は x'/η') を大きくするほど、dx (又は dx') の係数の値は増して、伸縮計としての感度を増すわけであるが、実際にはヤング率Eが有限であるから、線の弛みを或る程度小さくすると、却って感度が減小する。仮に土地が伸びた場合を考えて見ると、これによって線の弛み η は減るが、同時に線の張力が増して線が伸びる。ところが線の伸びは η を増すことになるので、両者が打消し合って結局余り η が変らないのである。また、錘Mを取附けることは感度の点で少しも有利でないことが分る。しかも、第22図に示す如く、Mを取付けた方が同じ鋼線の弛みに対して遥かに張力が大きくなるので、この点からもMを取付けることは好ましくない。現在の鋼線では、錘なしで x/η の値が60



第21図

実線(計算値)、◎(実験値) } M=0

破線(計算値)、×(実験値) } M=100 gr.



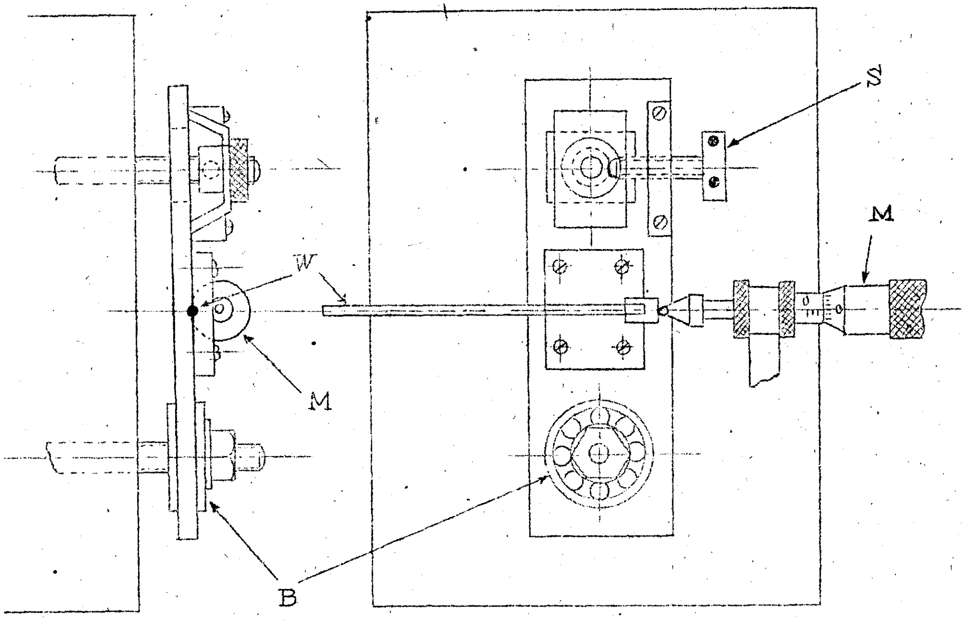
第 22 図

附近であることが最も良好な状態といえる。今回は錘なし、$x/\eta = 66$ の状態で観測を行うこととした。この場合の鋼線に働く全張力は 7.5 Kg weight である。

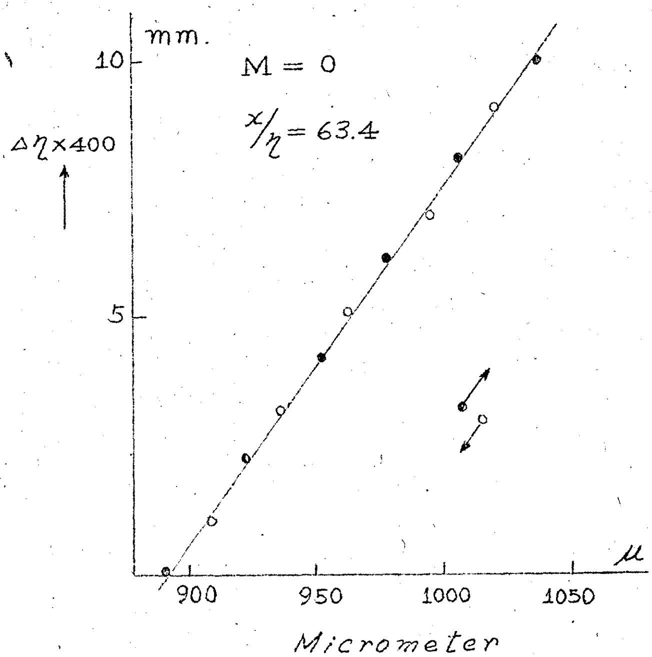
第21図に◎及び×で記入したものは感度試験の結果である。M＝0 と M＝100 gr. の場合につき、x/η（或は x'/η'）のいろいろの値につき行った。鋼線の一端を固定し、一端を微動装置により微小に移動させ、これに相当する η の変化を 2.5 cm の挺子を用い、50 cm の長さの光挺子にて測ったものである。第23図は微動装置及びマイクロメータであって、二本のボルトによってコンクリート・ブロックに取付けられるようになっている。実際の観測のときは、この微動装置は取りはずし、鋼線はブロックに固定される。

鋼線の両端の距離 X が dX だけ変化したとき、それが V 倍されて η の変化 $d\eta$ となって現れるとすれば、

$$V = \frac{d\eta}{dX} = \frac{1}{2}\frac{d\eta}{dx}$$ である。実験の結果



感度試験装置　Bボールベアリング、　S微動螺子
第２３図　　　　　　Mマイクロメーター、　W鋼　線



第２４図　感度試験結果

は、計算通りに x/η の増加と共に感度が減少しているが、計算値の $E=16\times10^{11}$ の場合に近い、しかし資料試験で得たEの値は約12×10^{11}で多少の相違がある、この原因は今のところ不明であるが、線に巻きぐせが残っているための影響が大きいものと思う。

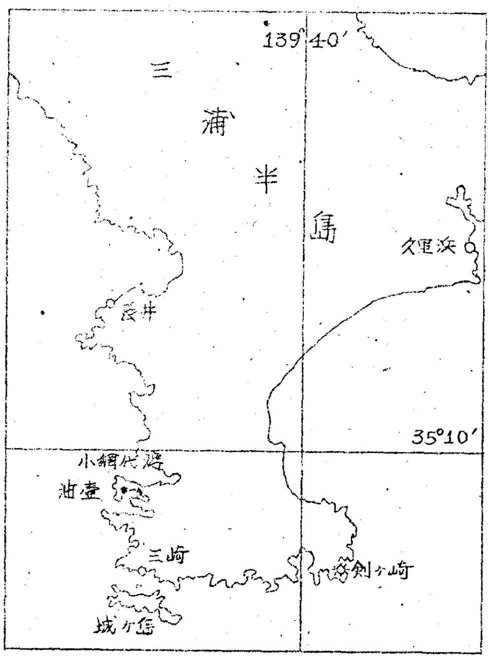
この土地伸縮計の使用結果は、観測を相当期間行った後に報告する。

第2章　潮汐の負荷による土地の傾斜及び伸縮

1. 観測の現状

観測が行われているのは三浦半島の南端、神奈川県三崎町にある、東京大学油壺臨海実験所の構内である（第25図参照）。この附近の地質学的な調査はまだ行われていないが、砂岩を主体に頁岩を混えて成層している第3紀層である。油壺湾に面する、高さ10数mの丘の脚部に作られた横坑が観測用に用いられ、巾、高さ共に2m強であり、平面的な形状は第26図に見られる通りであって、30m弱の主幹部は海岸と約10mを隔てつゝこれに平行している。

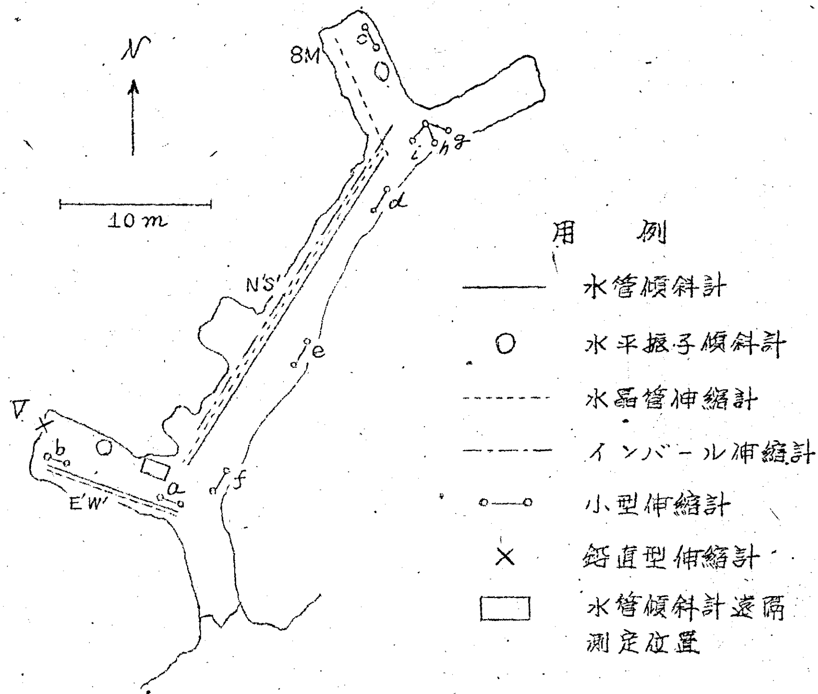
壕内の温度変化は一日中を通じて1°Cの数分の1に過ぎず、湿度も亦特別の季節を除いては余り高くない。



• 観測壕　× 検潮儀

第25図

以上の如き観測壕に於て地殻変動を観測している訳であるが、用いられている器械の配置は第26図の通りで、それ等の諸常



第 26 図

数は第Ⅰ表に示されている。

機構上水管傾斜計二台は定時観測（0800, 1600）であるが、水晶管伸

第 Ⅰ 表

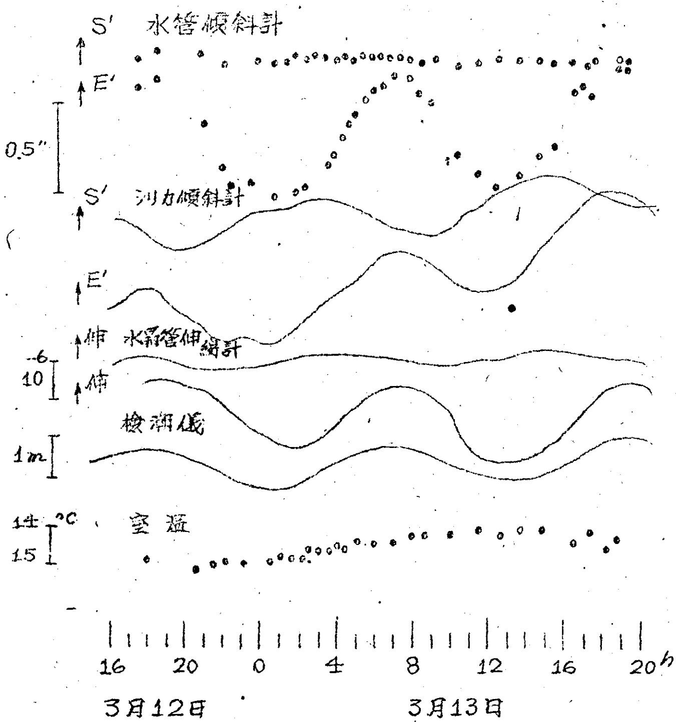
	成分	設置方向	スパン	感度
水管傾斜計	E'W'	N81°W	10 m	マイクロメーターの読み50μが1秒角
	N'S'	N22°E	25	〃　125μ　〃
水平振子傾斜計	E'W'	N81°W	—	記録紙上　1.0cm　〃
	N'S'	N22°E	—	〃　〃　〃
水晶管伸縮計	E'W'	N81°W	10	記録紙上 1.0cm が 3.3×10^{-6}
	N'S'	N22°E	25	〃　〃　1.3×10^{-6}
	8 M	N25°W	8	〃　〃　3.8×10^{-6}
	∇	鉛直	2.0	〃　〃　2.5×10^{-6}
	小型	各種	1.0	〃　〃　5.5×10^{-6}

縮計（N'S', E'W', 3M, ∇）及び水平振子傾斜計（二台）は7日捲きの時計装置で連続観測を行っている。壕内各処の1m伸縮計は常時は用いず、必要に応じて1台の器械を共用する。常三ケ所に温度計が設けてあって水管傾斜計の観測毎に室温を測定している。

2. 短週期変動と潮汐との関係

写真5は観測記録の実例であるが、一見して判るように半日週期らしいものが著しく現われている。これは伸縮計ばかりでなく、水管傾斜計に於ても連続的に観測すれば明らかに認められることである（第27図参照）。この種類の変動を短週期変動と呼ぶことにするが、本章で述べるのは主にこの変化に関した事柄である。

傾斜計記録と潮汐との関係については既に高橋博士が詳しく研究され



第27図

ているが[1]、伸縮計記録に見られる短週期変化が潮汐と関係あることも亦容易に想像される処である。第27図はある1日につき各種の記録を対応させたものであつて、これらの事情が明瞭に認められる。

以上のような考えに基き各記録を調和分析にかけた結果は第II表の通りである。分析に用いた材料は昭和23年3月中旬より1ケ月(一部半

第 II 表

	成 分	振 巾 H	遅 角 K
水晶管伸縮計	E'W'	3.0×10^{-7}	143°
	N'S'	-6.3×10^{-8}	188°
水平振子伸縮計	E'W'	0.10″(5.0×10^{-7})	152°
	N'S'	0.065″(3.2×10^{-7})	178°
潮 汐*)		35.2 cm	152.6°

*) 中野猿人:「潮汐学」附録

ケ月)間のもので、期間としては短か過ぎる嫌いがある為、他の分潮に比較的影響されないM_2分潮に着目する事にした。その結果当面の目的には以上の材料で間に合うものと思われる。

遅角について見るとE'W'成分は大体潮汐の値に近く両者の関係の密接な事が想像される。N'S'成分のそれはやゝ大きく出ているが、之は恐らく振巾が小さいのと期間が短い為に由来するものと考えられるから、この喰違いに深い意味をもたせぬ方が適当であろう。

3. 土地伸縮の均一性

点の変動状態に及ぼす観測壕の影響は、今後研究を進めるに当って是非解決して置かねばならぬ問題であるが、その一端を調べた結果は次の通りである。

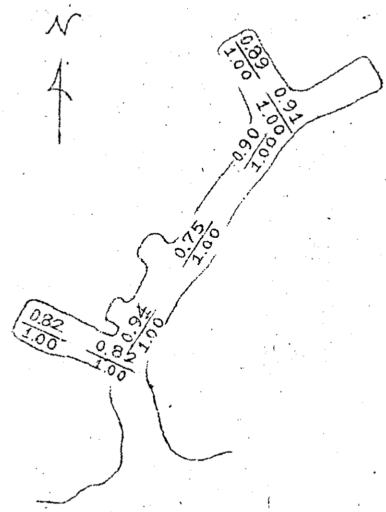
---

(1) 高橋龍太郎、震研彙報、第6巻(昭和4年)85頁

土地の伸縮は大型の水晶管伸縮計で常時観測されているが、その示す値は伸縮計のスパン10m前後に亘る伸縮の平均的な状態と考えられる。一方観測壕の大きさもこの程度であるから、仮に壁の存在が影響を与えるとしても認めようがない訳である。その為、之に平行して小型伸縮計を設置し之等の観測結果を比較する事を試みた次第である。

観測器械は小型三成分伸縮計の一成分をとり出したような構造のものを用い、一ケ所1,2週間の割合で移動しつゝ観測を行うことにした。観測地点は第26図中の a～f の6点と、別に小型三成分伸縮計によるものの合計7点であって、期間は昭和23年10月から翌年2月の間である。

得られた記録の短週期変動（伸縮率）の振巾の、大型伸縮計によるものに対する比は第28図の通りであって、夫々の観測地点に、横線を観測方向に向けて記入してある。それによると比は0.8～0.9程度であって、現在の精度では一定と見なすのが適当であろう。そして数値が明らかに1.0より低く出ているのは、大型伸縮計の実倍率が幾何倍率より小さいといったような、組織的な原因によるものと思われる。いずれにせよ以上の試みからは、観測壕内での著しい不均一性は認められず、又この程度のひろがりの中では土地の伸縮を均一と考えてよさそうな事が判る。



第 28 図

4. 短週期変動から導かれる歪の状態

観測結果から、短週期変動に由来する歪の状態は種々に表現出来るが、その中歪の最大に現われる方向が興味あるように見受けられるので、主にこの点について述べることにする。こゝでは単に運動学的な取扱いに

止めて、弾性論的な考察は次章に廻すことにする。

(i) 傾斜について。　現在傾斜はE'W'、N'S'の両方向について（水管傾斜計、水平振子傾斜計夫）観測されているから、この附近の土地が剛体的に運動すると仮定すれば、傾斜の最大方向が求められる。前述の通り昭和23年3月12日には水管傾斜計の連続的な観測が行われたが、その結果によると海水面の上昇1mに対する傾斜は

S'方向へ　　0.04″

E'方向へ　　0.51″

となり、結局観測点の土地は

S64°E へ　0.53″

傾斜することになる。

一方連続観測が行われている水平振子型傾斜計によればこの附近は海水面の上昇1mに対して、

S51°E へ　0.54″

傾斜する事になり、又嘗て同型の傾斜計を用いて高橋博士が観測されたところでは[2)]

S58.5°E へ　0.67″

の値が得られている。[3)]

以上三組の数値間には夫々若干の開きがあるが、それは主として器械の構造の相異又は観測地点の性質等の影響によるものと思われ、大勢としてこの附近の傾斜状態を知るに足りると思われる。

この様な結果が、荷重による半無限弾性体表面の傾斜として説明されることは既に高橋教授の試みられたところであって、更めて此処では述べない。之と同様な立場より、傾斜、伸縮の両変動を包括して理論的に

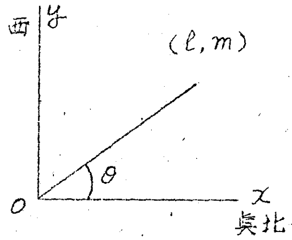
(2) 高橋龍太郎：震研彙報　第6巻（昭和4年）85頁

(3) 観測点は現在の位置より約20m 離れている。

取扱う試みについては後の章に記される筈である。

(ii) 伸縮について。伸縮計の設置されているのは第　表の如く三方向であるから、無限小一次変形として土地の歪を二次元的に表現することが出来る。

今座標軸として第29図のようにとり、歪の成分を e_{xx}, e_{yy}, e_{xy} とすれば、i なる方向(その方向余弦を l, m とする)の伸長量 e_i は



第29図

$$e_i = e_{xx}l^2 + e_{yy}m^2 + e_{xy}lm \cdots\cdots(1)$$

で与えられる。

今の場合伸縮計 N'S', E'W', 8M(夫々を 1, 2, 3 で区別する)の方向は N22°E, N81°W, N25°W であるから

$$\left.\begin{aligned} e_1 &= 0.859\,e_{xx} + 0.141\,e_{yy} - 0.348\,e_{xy} \\ e_2 &= 0.024\,e_{xx} + 0.976\,e_{yy} + 0.154\,e_{xy} \\ e_3 &= 0.821\,e_{xx} + 0.179\,e_{yy} + 0.383\,e_{xy} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(2)$$

となり、この連立方程式を解くことにより

$$\left.\begin{aligned} e_{xx} &= 0.5858\,e_1 - 0.1967\,e_2 + 0.6111\,e_3 \\ e_{yy} &= 0.1981\,e_1 + 1.0397\,e_2 - 0.2399\,e_3 \\ e_{xy} &= -1.348\,e_1 - 0.0642\,e_2 + 1.412\,e_3 \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(3)$$

が得られる。

ところで観測によれば、海水面の上昇 1 m に対する伸長量は

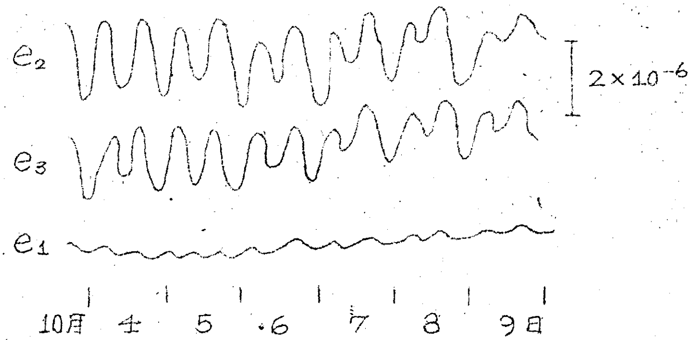
$$\left.\begin{aligned} e_1 &= 0.07 \times 10^{-6} \\ e_2 &= 1.44 \times 10^{-6} \\ e_3 &= 0.94 \times 10^{-6} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots(4)$$

に達する。これらの関係を昭和23年10月初旬の例にとって見ると第30図のようになる。

上の値を(3)に代入すれば、歪の成分として

$$\left.\begin{aligned} e_{xx} &= 0.33\times10^{-6} \\ e_{yy} &= 1.35\times10^{-6} \\ e_{xy} &= 1.09\times10^{-6} \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

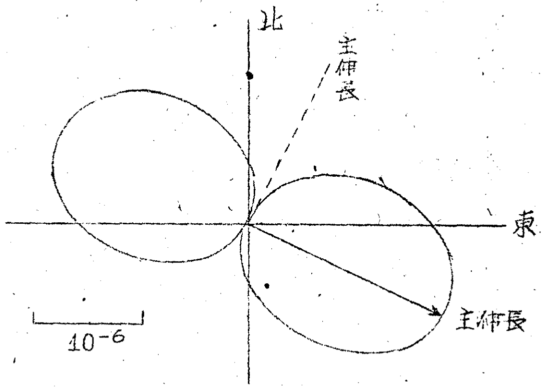
が得られる。これらの値を適当に組合せれば種々の歪が求められる訳であるが、こゝではその一例として歪の楕円及び主伸長の方向と大きさを求めることにする。



第 30 図

歪の楕円を求めるには (1) に種々の (ℓ, m) を代入すればよく、その結果は第31図の通りである。又主伸長の大きさを e、方位角を θ とすれば歪の成分との間には

$$\begin{vmatrix} e_{xx}-e & \frac{1}{2}e_{xy} \\ \frac{1}{2}e_{xy} & e_{yy}-e \end{vmatrix} = 0 \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$



第 31 図

及び

$$\tan\theta = -\frac{e_{xx}-e}{\frac{1}{2}e_{xy}} \cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

なる関係があるから、(5) を用いて

$$e = 1.61\times10^{-6} \quad (最大)$$
$$\quad 0.07\times10^{-6} \quad (最小)$$

$$\theta = 66^\circ \quad (最大主伸長軸の方位角)$$

なる結果が得られる。

こゝに興味あるのは主伸長軸の方向が、傾斜最大の方向と略々一致していることである。短週期変動を理論的に説明しようとする試みは次章に於て行われるが、上の事実の説明もその場合になされるべきものである。

(iii) 鉛直方向の伸縮について。　二次元的な歪の状態は大体上述の通りであるが、最後に鉛直型伸縮計の観測結果について一言する。これはいわば e_{zz} を測定するものであるから、三次元的な状態を完全に指定するにはまだ e_{xz}, e_{yz} に相当する量が不足である。従ってこゝに述べることは三次元への橋渡しに過ぎない。

この伸縮計の設置場所は第26図中に見られるが、前と同じようにして海水面の上昇 1 m に対する伸長量を求めると

$$e_{zz} = -1.53 \times 10^{-6}$$

となる。

今体積伸長をDとすれば

$$D = e_{xx} + e_{yy} + e_{zz}$$

であるから、既に判明している値を用いて

$$D = 0.15 \times 10^{-6} \quad (海水面の上昇 1 m 当り)$$

になる。従って現在の観測精度ではDは殆んど0と考えた方が無難であって、この事実は今後潮汐荷重による土地変動を弾性体論的に考察する場合、重要な役割を果すものと考えられる。

第3章　潮汐の負荷に依る傾斜及伸縮に関する理論的考察

1. 等方性半無限弾性体の表面荷重による変形としての取扱い

従来地殻潮汐の問題に関連して、海水の荷重による土地の変形が研究

されているが、その方法は主として等方性半無限弾性体の表面荷重による変形を所謂 Boussinesq 問題として取扱つている、高橋教授[1]もこの方法によつて油壷に於ける傾斜観測の結果を整理された、本報文に於いても一応この方法によつて、土地の伸縮を整理考察し、高橋教授および筆者等の傾斜観測結果との調和性を吟味してみよう。なおすでに高橋教授が指摘されたように、現在問題にしている変形を起し得ると思われるあらゆる原因を検討した結果、潮汐の負荷による変形のみが可能性を有すると考えられるのである。

海面の上昇に伴つて、海底におよぼす力のうちで主なものは垂直力であるが、海底に傾斜があれば当然若干の水平力を生じるわけであつて、海面が Δh だけ高まつた時の垂直力の増加を P_1, 水平力の x－成分および y－成分の増加をそれぞれ P_2, P_3 とすれば、海底の形を

$$z = h(x, y)$$

とするとき次のようになる。

$$\left.\begin{aligned} P_1 &= \frac{\rho g \Delta h}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \\ P_2 &= \frac{-\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial x}}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \\ P_3 &= \frac{-\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial y}}{\sqrt{1+\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2}} \end{aligned}\right\} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

但し ρ は海水の密度、g は重力の加速度である、海底の傾斜量が小として $\left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^2$, $\left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^2$ が省略可能であるとすると，(1)は

$$P_1 = \rho g \Delta h, \quad P_2 = -\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial x}, \quad P_3 = -\rho g \Delta h \frac{\partial h}{\partial y} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

(1) 高橋龍太郎、地震研究所彙報 6 (1929) 86

と書ける。

従来の海水の垂直荷重のみを考慮していた方法の妥当性は、傾斜のみが観測されていたことによるのであって、伸縮をも考える時は、海底の水平力の分布による変形も後に示すように、決して無視出来ない程度となる。

等方半無限弾性体の表面の原点に、P_1, P_2, および P_3 が働いた時の変位に夫々 1, 2 および 3 というサフィックスをつけると変位は弾性論により次のように与えられる。

$$\left.\begin{aligned}
u_1 &= \frac{P_1}{4\pi\mu}\frac{zx}{R^3} - \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{x}{R(R+z)} \\
v_1 &= \frac{P_1}{4\pi\mu}\frac{yz}{R^3} - \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{y}{R(R+z)} \\
w_1 &= \frac{P_1}{4\pi\mu}\frac{z^2}{R^3} + \frac{P_1}{4\pi\mu}\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\frac{1}{R}
\end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots (3)$$

$$\left.\begin{aligned}
u_2 &= \frac{P_2}{4\pi\mu}\left(\frac{1}{R}+\frac{x^2}{R^3}\right) + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)}\left\{\frac{1}{R+z} - \frac{x^2}{R(R+z)^2}\right\} \\
v_2 &= \frac{P_2}{4\pi\mu}\frac{xy}{R^3} - \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{xy}{R(R+z)^2} \\
w_2 &= \frac{P_2}{4\pi\mu}\frac{zx}{R^3} + \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{x}{R(R+z)}
\end{aligned}\right\} (4)$$

$$\left.\begin{aligned}
u_3 &= \frac{P_3}{4\pi\mu}\frac{xy}{R^3} - \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{xy}{R(R+z)^2} \\
v_3 &= \frac{P_3}{4\pi\mu}\left(\frac{1}{R}+\frac{y^2}{R^3}\right) + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)}\left\{\frac{1}{R+z} - \frac{y^2}{R(R+z)^2}\right\} \\
w_3 &= \frac{P_3}{4\pi\mu}\frac{yz}{R_3} + \frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)}\frac{y}{R(R+z)}
\end{aligned}\right\} (5)$$

$$R^2 = x^2 + y^2 + z^2$$

但し u, v および w はそれぞれ x, y, および z 方向の変位であり、z は弾性体の内部に向う方向を正とする。

上式より表面即ち $z=0$ における x−方向の伸びおよび傾斜、z−方向の伸びを計算すると次のようになる。

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)_0 = \frac{P_1}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x^2-y^2}{r^4}$$

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}\right)_0 = -\frac{P_1}{4\pi\mu} \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \frac{x}{r^3} \qquad \cdots\cdots (6)$$

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial z}\right)_0 = 0$$

$$\left(\frac{\partial u_2}{\partial x}\right)_0 = \frac{P_2}{4\pi\mu} \cdot \frac{x(r^2-3x^2)}{r^5} - \frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{3xy^2}{r^5}$$

$$\left(\frac{\partial w_2}{\partial x}\right)_0 = -\frac{P_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{x^2-y^2}{r^4} \qquad \cdots\cdots (7)$$

$$\left(\frac{\partial w_2}{\partial z}\right)_0 = \frac{P_2}{4\pi\mu} \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \frac{x}{r^3}$$

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial x}\right)_0 = \frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \frac{y(r^2-3x^2)}{r^5}$$

$$\left(\frac{\partial w_3}{\partial x}\right)_0 = -\frac{P_3}{4\pi(\lambda+\mu)} \frac{2xy}{r^4} \qquad \cdots\cdots (8)$$

$$\left(\frac{\partial w_3}{\partial z}\right)_0 = \frac{P_3}{4\pi\mu} \frac{\lambda}{\lambda+\mu} \frac{y}{r^3}$$

$$r^2 = x^2 + y^2$$

かくして表面の一点に力が作用する場合の歪がわかったから、これらを実際の地形について積分して観測点に於ける歪を求めればよい。

実際に積分を行うにはよく用いられるように重力偏差の地形補正を求めるために用いる方法と類似の方法を使用出来る。この場合観測点を原点にとった、極座標に於いて $r = r_n \sim r_{n+1}$, $\phi = \phi_m \sim \phi_{m+1}$ にかこまれる部分の寄與を考えると、例えば

$$\iint \frac{x^2-y^2}{r^4} dx\,dy = \int_{r_n}^{r_{n+1}} \frac{dr}{r} \int_{\phi_m}^{\phi_{m+1}} (\cos^2\phi - \sin^2\phi)\,d\phi$$

$$= \left(\log \frac{r_{n+1}}{r_n}\right) \frac{1}{2} \left(\sin 2\phi_{m+1} - \sin 2\phi_m\right)$$

となる。$\log \frac{r_{n+1}}{r_n}$ および $\frac{1}{2}(\sin 2\phi_{m+1} - \sin 2\phi_m)$ の値がいず

れの区劃に於ても一定になるようにとれば、

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)_0 = \frac{K}{4\pi(\lambda+\mu)} \sum_{S_2} P_1 ,$$

$$K = \left(\log \frac{r_{n+1}}{r_n}\right) \frac{1}{2} \left(\sin 2\phi_{m+1} - \sin 2\phi_m\right)$$

となり、$\sum_{S_2}$ は上に指定した区劃毎の P_1 の値をたし合わすことを意味する。このようにして区劃の作り方がそれぞれの場合で次表の如く指定される。

第 III 表

	r	ϕ
S_1	$\log \frac{r_{n+1}}{r_n}$	$\sin \phi_{m+1} - \sin \phi_m$
C_1		$-(\cos \phi_{m+1} - \cos \phi_m)$
S_2		$\frac{1}{2}(\sin 2\phi_{m+1} - \sin 2\phi_m)$
C_2		$-\frac{1}{2}(\cos 2\phi_{m+1} - \cos 2\phi_m)$
S_3		$\frac{1}{3}(\sin 3\phi_{m+1} - \sin 3\phi_m)$
C_3		$-\frac{1}{3}(\cos 3\phi_{m+1} - \cos 3\phi_m)$

このような区劃を透明な紙にえがき、それを P_1, P_2, P_3 [2] 等の分布をあらわした図の上にかさねて、それぞれの区劃内の値を符号を考慮してたし合わして積分を行うことが出来る。その場合観測点に於ける各種の歪は

$$\left(\frac{\partial u_1}{\partial x}\right)_0 = \frac{K_2}{4\pi(\lambda+\mu)} \sum_{S_2} P_1 ,$$

$$\left(\frac{\partial w_1}{\partial x}\right)_0 = \frac{K_1}{4\pi\mu} \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu} \sum_{S_1} P_1 , \qquad \left(\frac{\partial w_1}{\partial z}\right) = 0 .$$

---

(2) P_2, P_3 は海図より1粁毎の水深をよみとつて隣同志の差をつくり、$\frac{\partial h}{\partial x}$ および $\frac{\partial h}{\partial y}$ を求めることによつて分布図をつくった、海図に関して御配慮をたまわつた須田晥次水路局長に感謝の意を表する。

$$\left(\frac{\partial u_2}{\partial x}\right)_0 = \frac{K_1}{16\pi\mu}\ \frac{5\lambda+8\mu}{\lambda+\mu}\sum_{S_1} P_2 + \frac{K_3}{16\pi\mu}\ \frac{3\lambda}{\lambda+\mu}\sum_{S_3} P_2\ ,$$

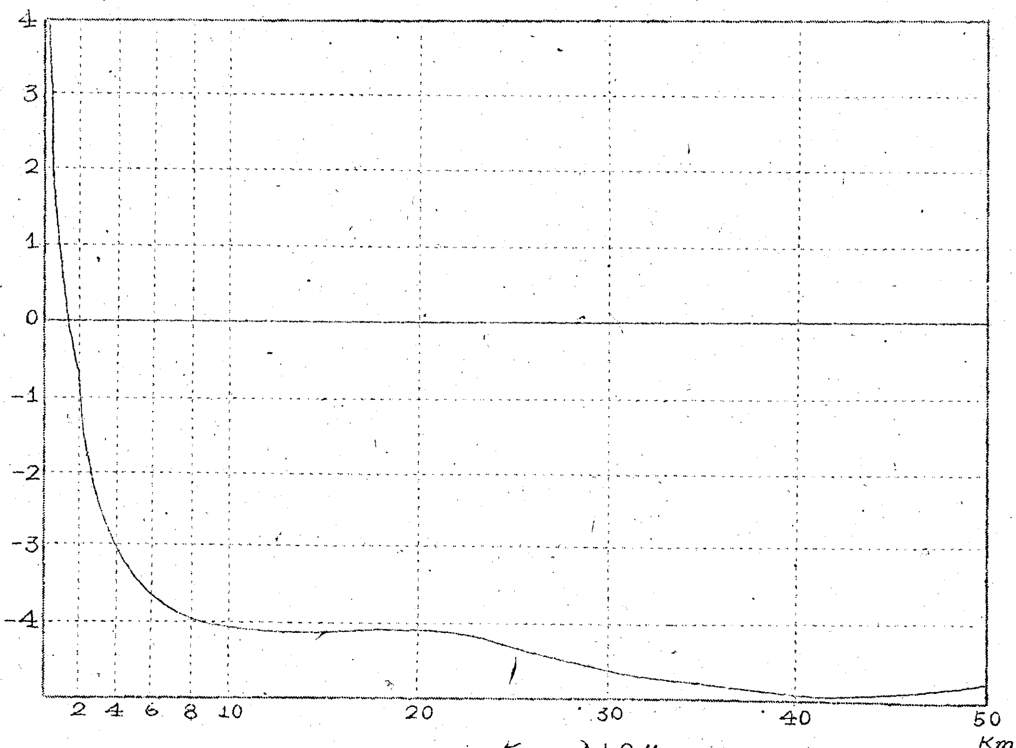
$$\left(\frac{\partial w_2}{\partial x}\right)_0 = -\frac{K_2}{4\pi(\lambda+\mu)}\sum_{S_2} P_2\ ,\quad \left(\frac{\partial w_2}{\partial z}\right)_0 = -\frac{K_1}{4\pi\mu}\ \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\sum_{S_1} P_2$$

$$\left(\frac{\partial u_3}{\partial x}\right) = -\frac{K_1}{16\pi\mu}\ \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\sum_{C_1} P_3 + \frac{K_3}{16\pi\mu}\ \frac{3\lambda}{\lambda+\mu}\sum_{C_3} P_3\ ,$$

$$\left(\frac{\partial w_3}{\partial x}\right)_0 = -\frac{K_2}{4\pi(\lambda+\mu)}\sum_{C_2} P_3\ ,\quad \left(\frac{\partial w_3}{\partial z}\right)_0 = -\frac{K_1}{4\pi\mu}\ \frac{\lambda}{\lambda+\mu}\sum_{C_1} P_3 .$$

等であらわされる、但しK_1, K_2, K_3等は区劃の切り方の粗密によってきまる常数であるがこれ等を一定値Kにとるのが便利である。

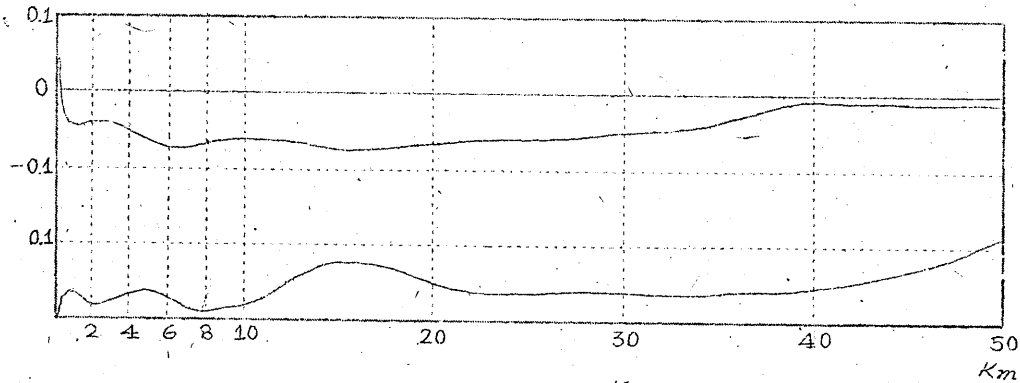
上記の方法を油壺の観測点に応用して1つの伸縮計の方向であるE9°S方向の傾斜を求めると第32図のようになる、即ち海面が一様に高ま



単位：$100 \times \frac{K}{4\pi\mu}\ \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\ \rho g \Delta h$

第32図　E9°S方向の垂直力による傾斜

ったとして、その荷重によるその方向の傾斜に比例した量を示す。図中横軸は粁であらわしてあり、その意味はその距離までの海水の荷重が観測点の傾斜におよぼす影響ということである。水平力による傾斜量は垂直力のそれにくらべて1～2%程度であるのでこの図においてははっきりしないが、縦軸を拡大してえがくと第33図のようになる。第32図からわかるように、観測結果を説明するためには100～200米程度以内の海水しか影響をもたないとしなければならないことは高橋教授が既に示されたところであって、その為めには地殻の有効剛性率が距離とと



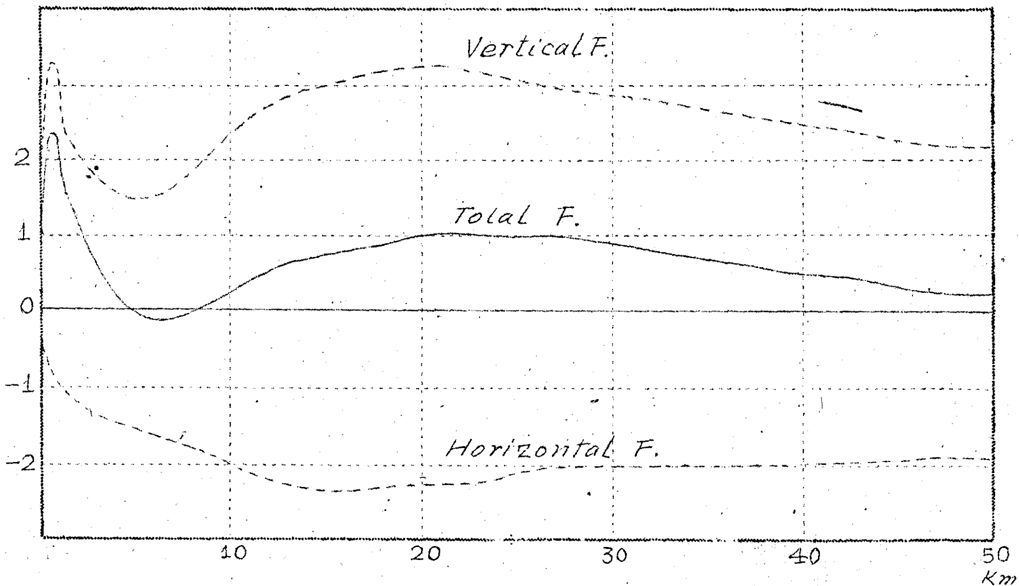
単位：$100 \times \frac{K}{4\pi(\lambda+\mu)} \rho g \Delta h$

第33図　上：E9°S方向の水平力によるE9°S方向の傾斜
下：N9°E方向の水平力によるE9°S方向の傾斜

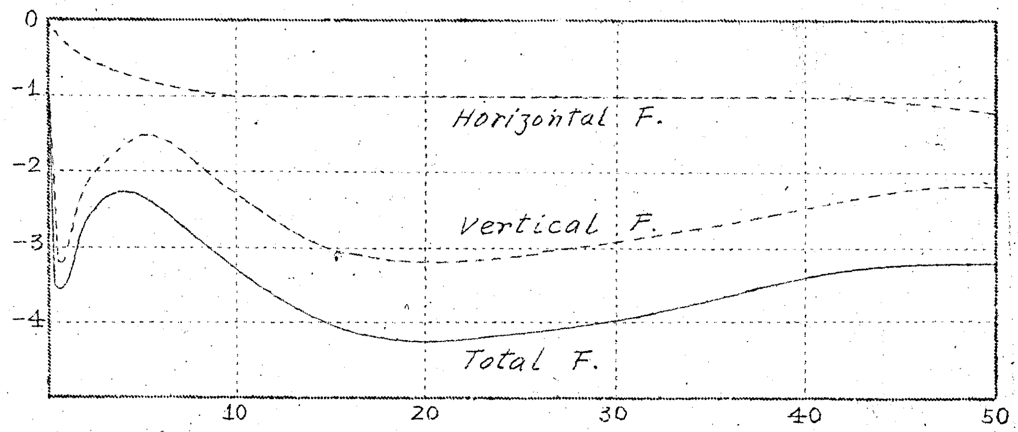
もに変化するという考えが提出されている。この方向に直角な方向の傾斜を計算することも同様に可能であり、その結果は既に高橋教授によってなされたところと全く一致する。

次に伸縮については如何になるであろうか？この場合$\lambda=\mu$として E9°S方向の伸びを求めてみると第34図のようになり、図中垂直力および水平力の影響を別々に求め、さらにその合成した結果を示してある。第35図はN9°E方向の伸び、第36図は鉛直方向の伸び(3)を示してあ

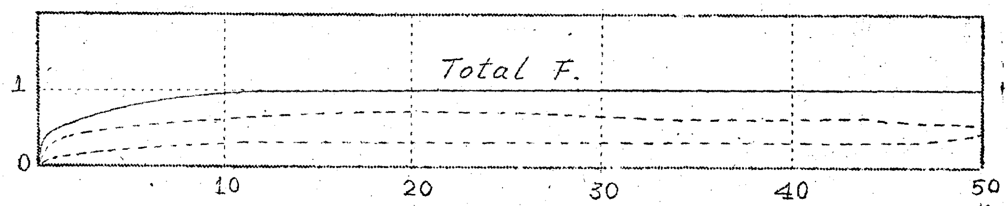
(3) $\frac{\partial w}{\partial z}$に於いては垂直力の寄與は全然ない。



第34図　E 9°S 方向の伸縮　　単位：$100 \times \frac{K}{8\pi\mu} \rho g \Delta h$



第35図　N 9°E 方向の伸縮　　単位：$100 \times \frac{K}{8\pi\mu} \rho g \Delta h$



第36図　鉛直方向の伸縮　　単位：$100 \times \frac{K}{8\pi\mu} \rho g \Delta h$

る。これらの図を見て明らかなように、伸縮に於ては水平力の寄與は相当大きく、時としては垂直力にほゞ匹敵する程度にさえなり得る。このことは注目すべき事実であつて、λとμとの大きさが多少変じても結論に大差は生じないであろう。

さて観測結果との比較であるが、前章に於て既に述べたように、E9°S方向は潮位の増加に伴つて伸び、N9°E方向はわずかに伸び、垂直方向は縮むという結果がえられている。したがつて上の数図にあらわれている理論値は垂直方向の伸縮において、観測と伸縮の符号が逆でありまたN9°E方向に於いては符号逆またその大きさも全くかけはなれている。これらの事情は如何なる範囲内の海水のみが影響するとしても説明不可能であつて、傾斜の観測結果を説明するために導入された剛性率の距離による変化という便宜的考え方は、伸縮をも考慮することによつて根底より打破されてしまうのである。

このように等方半無限弾性体表面上の観測と考える限りにおいては、海水荷重による水平力を考慮しても各種歪の大きさおよびその相互関係を説明することは本質的に不可能である。傾斜観測のみの場合においてさえも、川奈[4]別府[5]のそれのようにしばしば異常な事柄が発生することが報じられており、地殻構成の複雑性を考慮するとき、*Boussinesq* の解が適用出来るような場合のほうがむしろ稀であろうことも予想されるのである。それならば、現在の観測結果を理解し、説明するためにどのような地殻のモデルを採用すべきであるかについては、全く不明であつて、さらに各種歪の場所的変化などを測定した後に議論すべき段階にある。

2. 観測点附近の地形の影響

(4) 高橋龍太郎、地震研究所彙報 10(1932) 145.

(5) 西村英一; 地球物理 5(1941) 10.

前節において、半無限弾性体表面に於ける観測として理論的に期待される歪を求めて、観測結果との比較を試みたが、油臺附近の地形を考える時、観測点が半無限弾性体の表面にあるという近似がどの程度成立つかは必ずしも自明のことではない。この点を吟味するために本節に於いて、観測点附近の地形の影響を近似的に調べてみよう。

問題を簡単にするために、第３７図に示したように矩形の断面をもつ長い凸起が半無限体の表面にあるとし、この凸起の部分を除いて表面に垂直力が一様に作用する場合の釣合を考えてみる。実際の地形に於いてはこの凸起の幅を１００米、高さを１０米程度にとればほゞ観測点附近の情況を示しているものといえよう。

第　37　図

はじめに凸起のない場合を考え、半無限弾性体の表面（$z=0$）に於いて $-(a+l)<x<-a$ および $a<x<a+l$ の間にのみ $-Q$ なる密度で垂直力が働いた場合の変位を求め、$l\to\infty$ ならしめると

$$\left.\begin{aligned}
u &= \frac{Q}{2\pi(\lambda+\mu)}\Big\{(a+x)\tan^{-1}\frac{a+x}{z}+|a-x|\tan^{-1}\frac{|a-x|}{z} \\
&\qquad -\frac{z}{2}\log[z^2+(a+x)^2][z^2+(a-x)^2]\Big\} \\
&\quad +\frac{Q}{4\pi\mu}z\log[z^2+(a+x)^2][z^2+(a-x)^2] \\
w &= -\frac{Q}{2\pi(\lambda+\mu)}\Big\{z\tan^{-1}\frac{a+x}{z}+z\tan^{-1}\frac{|a-x|}{z} \\
&\qquad +\frac{a+x}{2}\log[z^2+(a+x)^2]+\frac{|a-x|}{2}\log[z^2+(a-x)^2]\Big\} \\
&\quad -\frac{Q}{4\pi\mu}\Big\{(a+x)\log[z^2+(a+x)^2]+(a-x)\log[z^2+(a-x)^2]\Big\}
\end{aligned}\right\}\quad(1)$$

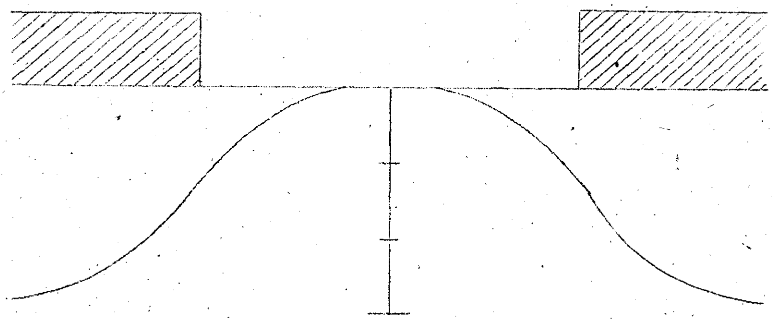
となり、$z=0$ に於ては

$$\left.\begin{aligned} u_0 &= 0 \\ w_0 &= -\frac{Q}{2\pi\mu}\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\left\{(a+x)\log(a+x)+|a-x|\log|a-x|\right\} \end{aligned}\right\} \quad (2)$$

さらに $x=0$ の時は

$$w_{00} = -\frac{Q}{\pi\mu}\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}a\log a \quad \cdots\cdots\cdots (3)$$

となる、$w_0 - w_{00}$ を図示すると第38図のようになる。



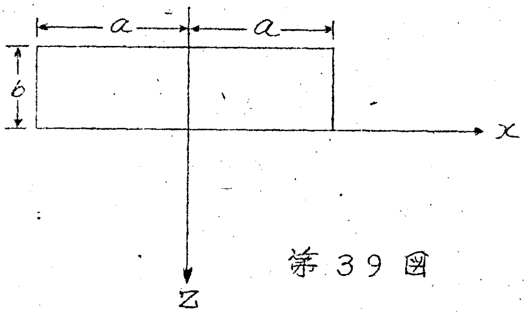
Relative Deformation
$w_0 - w_{00}$

第 38 図

次に突起部を考えて、この底面に (2) のような変位が加わった時の内部の張合いを考える。

その結果この底面に若干の歪力があらわれるはずであるから、この歪力を海水荷重の垂直力に加味して半無限体の釣合を考え、その結果生じる変位を再び凸起部の底面に加える。

このような操作を繰返すことによって、漸近的に張合状態を知り得ると考えられる。



第 39 図

第39図の如き矩形断面をもつ紙面に垂直な方向に無限に長い弾性体に於いて、

$$Z=0\text{ で}\quad u=0\quad w=\sum_S A_s\cos\alpha x^{(6)}\quad \alpha(s)=\frac{s\pi}{a}$$

とし、他の面では自由であるという條件のもとに、厳密な解を得ることは困難であるが

$$\left.\begin{aligned} u&=\left\{C_1 Ch\alpha z+D_1 Sh\alpha z+\frac{\lambda+\mu}{2\mu}z(A Sh\alpha z+B Ch\alpha z)\right\}\sin\alpha x^{(7)}\\ w&=\left\{C_3 Ch\alpha z+D_3 Sh\alpha z-\frac{\lambda+\mu}{2\mu}z(A Ch\alpha z+B Sh\alpha z)\right\}\cos\alpha x \end{aligned}\right\}(4)$$

なる形の解をとることによって釣合の式を満足し、境界條件を満足するために

$$\left.\begin{aligned} &C_1=0,\qquad C_3=A_s\\ &D_3=\frac{\lambda+3\mu}{2\mu\alpha}A,\qquad D_1+A_s=\frac{\lambda+3\mu}{2\mu\alpha}B\\ &A=-\frac{2\times A_s\frac{\lambda+\mu}{\mu}(\alpha b-ch\alpha b\,sh\alpha b)}{\frac{(\lambda+\mu)(\lambda+3\mu)}{\mu^2}ch^2\alpha b+\frac{(\lambda+\mu)^2}{\mu^2}\alpha^2b^2+1}\\ &B=\frac{2\alpha A_s\left(\frac{\lambda+\mu}{\mu}ch^2\alpha b+1\right)}{\frac{(\alpha+\mu)(\lambda+3\mu)}{\mu^2}ch^2\alpha b+\frac{(\lambda+\mu)^2}{\mu^2}\alpha^2b^2+1} \end{aligned}\right\}\cdots\cdots\cdots(5)$$

とすることによって、三面で $\widehat{xz}=0$, $Z=-b$ で $\widehat{zz}=0$ ならしめることが出来る。$x=\pm a$ で $\widehat{xx}=0$ にはならないのであるが、b が a に比して小さいとして b/a の自乗以上を省略出来る場合を考えると、

$$A=0,\qquad B=\frac{2\alpha\mu}{\lambda+2\mu}A_s$$

となり、且つ $\int_0^{-b}\widehat{xx}\,dz=\int_0^{-b}\widehat{xx}\,z\,dz$ となるから Saint-Venant の原理によってほゞ正しい解となる。從って底面 $Z=0$ に於ける歪力を

(6) (2)式より $A_0=-\dfrac{Q}{4\pi\mu}\dfrac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\log a$,

$$A_s=-\frac{Q}{\pi\mu}\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}2a(-1)^s\left(\frac{1}{2!}-\frac{(2s\pi)^2}{2.4!}+\frac{(2s\pi)^4}{3.6!}-\cdots\right)\quad s=1,2,\cdots$$

(7) Ch, Sh は夫々 $\cosh$, $\sinh$ の略記。

計算すると　　　$\widehat{zz} = \widehat{xz} = 0$

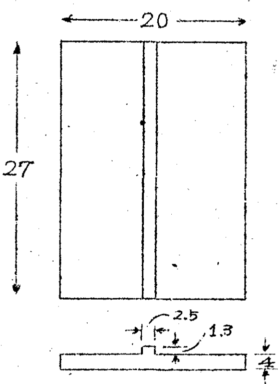
となり、この程度の省略を行うときは底面には歪力を生じないことになる。従って凸起部内の歪を単なる矩形断面体として求めれば、はじめに考えた凸起をもつ半無限体の場合の近似解を得ることになる。

従って凸起部中の変位は(4)式より

$$\left.\begin{aligned} u &= z\sum_s \frac{s\pi}{a} A_s \sin \frac{s\pi}{a} x \\ w &= \sum_s A_s \cos \frac{s\pi}{a} x \end{aligned}\right\} \cdots\cdots\cdots\cdots (6)$$

となり、wは底面の分布そのまゝがあらわれる。

以上の考察の外に寒天を用いて実験をも行った、第40図に示したような寸法の寒天をつくり、凸起部をのぞいた表面に板をしいてその上に錘をおくことによって、荷重を加えた。寒天の一面を黒く塗り、適当な間隔に白点をつけて、荷重前後の位置を写真によって比較し得るようにした。各点の垂直方向の変位を顕微鏡によって読取った値は第41図に示してある、凸起部の底面及びその延長上に於けるwの分布を図示した



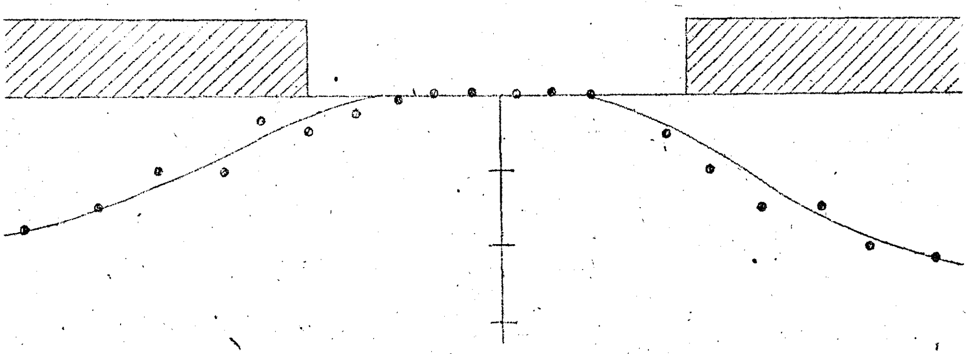
第40図
寒天模型の寸法単位: cm

					7	14	13	13	13				11	10					
					14	13	14	13	12	11	12	11	11	11					
						13	13	14	12	11	15	11	12	11					
					14	13	13	13	14	12	12	12	12	11					
					13	14	13	13	13	13	12	13	12	11					
					14	13	13	13	13	13	13	13	11	9					
25	20	19	17	17	14	15	14	13	13	13	13	13	13	17	17	19	19	21	22
25	19	18	19	16	15	15	13	13	13	13	13	13	13	14	16	16	18	19	22
25	20	18	17	14	14	13	13	13	13	13	13	13	13	14	16	16	17	18	22

第41図　wを読み取った値

のが第42図であって、左右の圧力の不平等をのぞいて、前に理論的に計算した分布とよい一致を示す。

また凸起部内のwが底面の分布と等しいこともよくあらわれている。



Relative Deformation

$w_0 - w_{00}$

第42図　実験により求めた変位

このようにして上述の理論式による計算はほゞ実際の場合に適用可能であることがわかつた。

次に(6)によって、凸起部内にどのような歪があらわれるかを求めてみよう、即ち、

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} = z\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 \sum_s S^2 A_s \cos\frac{s\pi}{a}x$$

$$\frac{\partial w}{\partial x} = -\frac{\pi}{a}\sum_s s A_s \sin\frac{s\pi}{a}x$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

となるが、傾斜 $\frac{\partial w}{\partial x}$ は凸起がない場合に一致し、垂直方向の伸び $\frac{\partial w}{\partial z}$ は全くあらわれない。

これに反して水平方向の伸縮 $\frac{\partial u}{\partial x}$ があらわれるが、それは実験からもわかるように極めて小さい。

以上の理論的および実験的考察を要約すると結局次のようなことが云える。幅にくらべて高さがあまり高くない突起がある半無限体の凸起部をのぞいた表面に圧力を加えた場合、凸起部内におこる歪は傾斜および垂直方向の伸びに於いて凸起のない場合の半無限体の表面の歪と全く同等となり、水平方向の伸びは凸起のない場合には表面に於て０であるのが、凸起部内に高さに比例した伸縮を生ずる．但しその大きさは傾斜に

くらべて極めて小さい。

かくして地形の影響は存外に小さいことになり、観測点附近の地形の影響を考慮しても、観測結果と地殻を等方均質な弾性体として取扱う理論より期待される結果との食違いは説明され得ないことになる。したがって、この食違いは Boussinesq 理論の適用不可能なことを意味していると解釈され、その原因は地殻構成の複雑性にもとづくものと理解されるのである。

第4章　構成岩石の弾性率

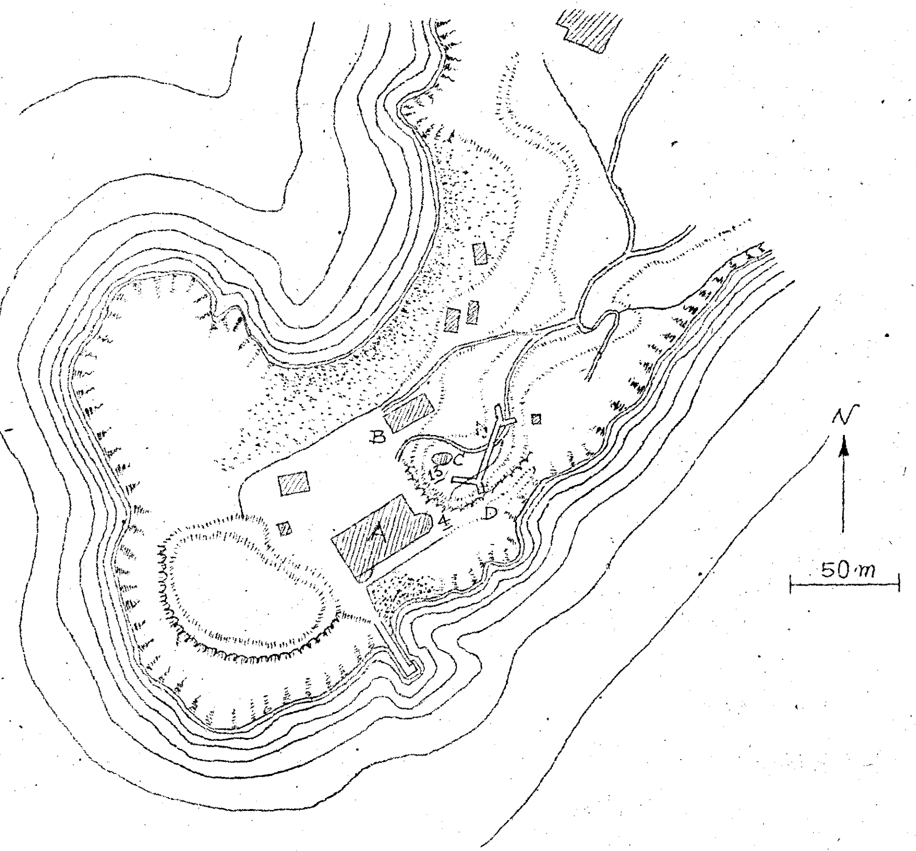
鉛直型伸縮計の記録を見ると、潮汐による変化にかさなって、ジグザクとした変化が見られる。この変化は第43図に示すように、伸縮計設置箇所の上方にある臨海実験所附属水族館に給水する水槽の増水および減水に伴うものである。水族館に給水が行われていなかった昭和24年3月13日までの記録にはこの変化があらわれていない。つまり土地の表面に荷重を加えた時および取去った時の伸縮を測定していることになる。したがって、この実験より土地の弾性率を求めることが出来る。

水槽は長径8.1米、短径3.8米の楕円形の断面をもち、水面が或る程度下ると自働的に注水するようになっていて、その水量の較差は計算によって約47立方米であることが知られる。

はじめにこの問題を半無限弾性体表面に点荷重 $-\Pi$ を作用させた場合として考えてみる。作用点を原点とした円壔坐標をとって、下向きにその正の方向をとる時、半径方向およびZの方向の変位はよく知られたように

$$\left.\begin{aligned} u &= \frac{\Pi}{4\pi\mu}\left\{\frac{zr}{(r^2+z^2)^{3/2}} - \frac{\mu}{\lambda+\mu}\left(\frac{1}{r} - \frac{z}{r(r^2+z^2)^{1/2}}\right)\right\} \\ w &= \frac{\Pi}{4\pi\mu}\left\{\frac{z^2}{(r^2+z^2)^{3/2}} + \frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\,\frac{1}{(r^2+z^2)^{1/2}}\right\} \end{aligned}\right\}$$

で與えられる、したがって伸張は



A：臨海実験所本館　　B：附属水族館　　C：水槽

D：観測壕入口　　（数字は崖の高さを米にて示す）

第43図　観測壕附近地形図

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial r}&=\frac{\Pi}{4\pi\mu}\left\{\frac{z(z^2-2r^2)}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}}-\frac{\mu}{\lambda+\mu}\left(\frac{z(z^2+2r^2)}{r^2(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}-\frac{1}{r^2}\right)\right\}\\ \frac{\partial w}{\partial z}&=\frac{\Pi}{4\pi\mu}\left\{-\frac{z(z^2-2r^2)}{(r^2+z^2)^{\frac{5}{2}}}-\frac{\lambda+2\mu}{\lambda+\mu}\,\frac{z}{(r^2+z^2)^{\frac{3}{2}}}\right\}\end{aligned}\right\}$$

となる。

次に荷重が半径aの円内に一様に分布していると考えた場合[1]には、変位は

(1) 寺沢寛一、東京帝国大学理学部紀要 37(1916) 1.

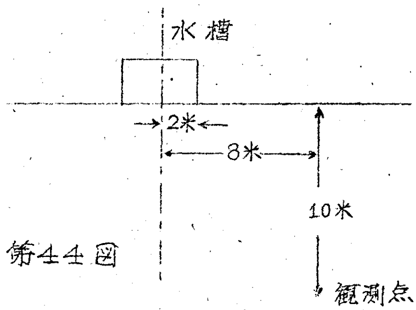
$$
\left.
\begin{aligned}
u &= \frac{\pi z}{2\pi a\mu}\int_0^\infty e^{-kz} J_1(kr) J_1(ka)\,dk \\
&\qquad - \frac{\pi}{2\pi a(\lambda+\mu)}\int_0^\infty e^{-kz} J_1(kr) J_1(ka)\,\frac{dk}{k} \\
w &= \frac{\pi z}{2\pi a\mu}\int_0^\infty e^{-kz} J_0(kr) J_1(ka)\,dk \\
&\qquad + \frac{\pi(\lambda+2\mu)}{2\pi a\mu(\lambda+\mu)}\int_0^\infty e^{-kz} J_0(kr) J_1(ka)\,\frac{dk}{k}
\end{aligned}
\right\}
$$

となり、伸張は

$$
\left.
\begin{aligned}
\frac{\partial u}{\partial r} &= \frac{\pi z}{2\pi a\mu}\int_0^\infty e^{-kz} J_1'(kr) J_1(ka)\,k\,dk \\
&\qquad - \frac{\pi}{2\pi a(\lambda+\mu)}\int_0^\infty e^{-kz} J_1'(kr) J_1(ka)\,dk \\
\frac{\partial w}{\partial z} &= \frac{-\pi}{2\pi a(\lambda+\mu)}\int_0^\infty e^{-kz} J_0(kr) J_1(ka)\,dk \\
&\qquad - \frac{\pi z}{2\pi a\mu}\int_0^\infty e^{-kz} J_0(kr) J_1(ka)\,k\,dk
\end{aligned}
\right\}
$$

となる。この式に含まれている無限積分は楕円函数若しくは楕円積分に変換することにより、数値計算に都合のよい形にすることが出来る。

$\frac{\partial w}{\partial z}$ の測定値 2.4×10^{-7} および π 第44図に示す a, r, z 等の値を代入し、λ と μ の関係を適当に仮定することにより、剛性率 μ を求めることが出来る。



第44図

このようにして求めた μ の値を $\lambda=\mu$, $\lambda=2\mu$ の場合について示す。

第 IV 図

	点荷重	円荷重	高橋[2]
$\lambda=\mu$	1.1×10^{10}	0.92×10^{10}	1.4×10^{10}
$\lambda=2\mu$	1.0×10^{10}	0.81×10^{10}	

(2) 高橋龍太郎、前出

なお比較の為に、高橋教授が論文に記載している試験片について実験よりもとめた値を併記しておく。

このようにして、表面荷重による変形よりもとめた弾性率の値は実際に試験片よりもとめた値とほゞ一致している。またこゝにもとめた弾性率を用いて$\frac{\partial u}{\partial r}$を計算してみると$10^{-8}$以下となり、実際観測壕に於ける水平伸縮計に水槽の影響と思われる変化が記録されないことも理解される。

上記の議論は、土地を半無限として取扱い観測壕や地形の影響を度外視しているが、これらの影響を考慮することは数学的に極めて困難であるので、それに対する考慮はしないことにする。

第5章　長期変動（昭和23年3月－昭和24年3月）

油壺に諸種の測定器を設置してから、約1年を経過したが、その観測結果について述べる。伸縮計及びシリカ傾斜計について1週間巻きの自記記録から毎時の値を読みとって、24時間についてとった日平均値を図に書きこんだものが第45図である。併記した温度は壕中に於いて1日に2回測定した温度の平均であり、潮位は地理調査所の報告をもととしている、また雨量は三浦半島南東端剣崎燈台の報告を用いてある。

この図をみてまず気付くことは伸縮計の$N'S'$成分が温度と平行に変化していることである。

次に温度変化が伸縮計に如何なる影響を与えるかを考察してみよう。シリカ管を外径a、内径bの無限に長い中空円筒として取扱えば、内外の温度がCe^{ipt}なる変化をする時、管中の半径r（$b<r<a$）の点に於ける温度変化は

$$u = C\frac{\alpha + i\beta}{\gamma_1 + i\delta}e^{ipt}$$

で与えられる。茲に

$$\alpha = \left(\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b - \mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\right)\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$-\left(\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b - \mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\right)\mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$+\left(\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a - \mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\right)\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$-\left(\mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a - \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\right)\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r\,.$$

$$\beta = \left(\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b - \mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\right)\mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$+\left(\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b - \mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\right)\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$+\left(\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a - \mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\right)\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r$$
$$+\left(\mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a - \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\right)\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,r\,.$$

$$\gamma = \mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b - \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b$$
$$-\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\,\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a + \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\,\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,.$$

$$\delta = \mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b + \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b$$
$$-\mathrm{ber}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\,\mathrm{kei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a - \mathrm{bei}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,b\,\mathrm{ker}\sqrt{\tfrac{p}{\varkappa}}\,a\,.$$

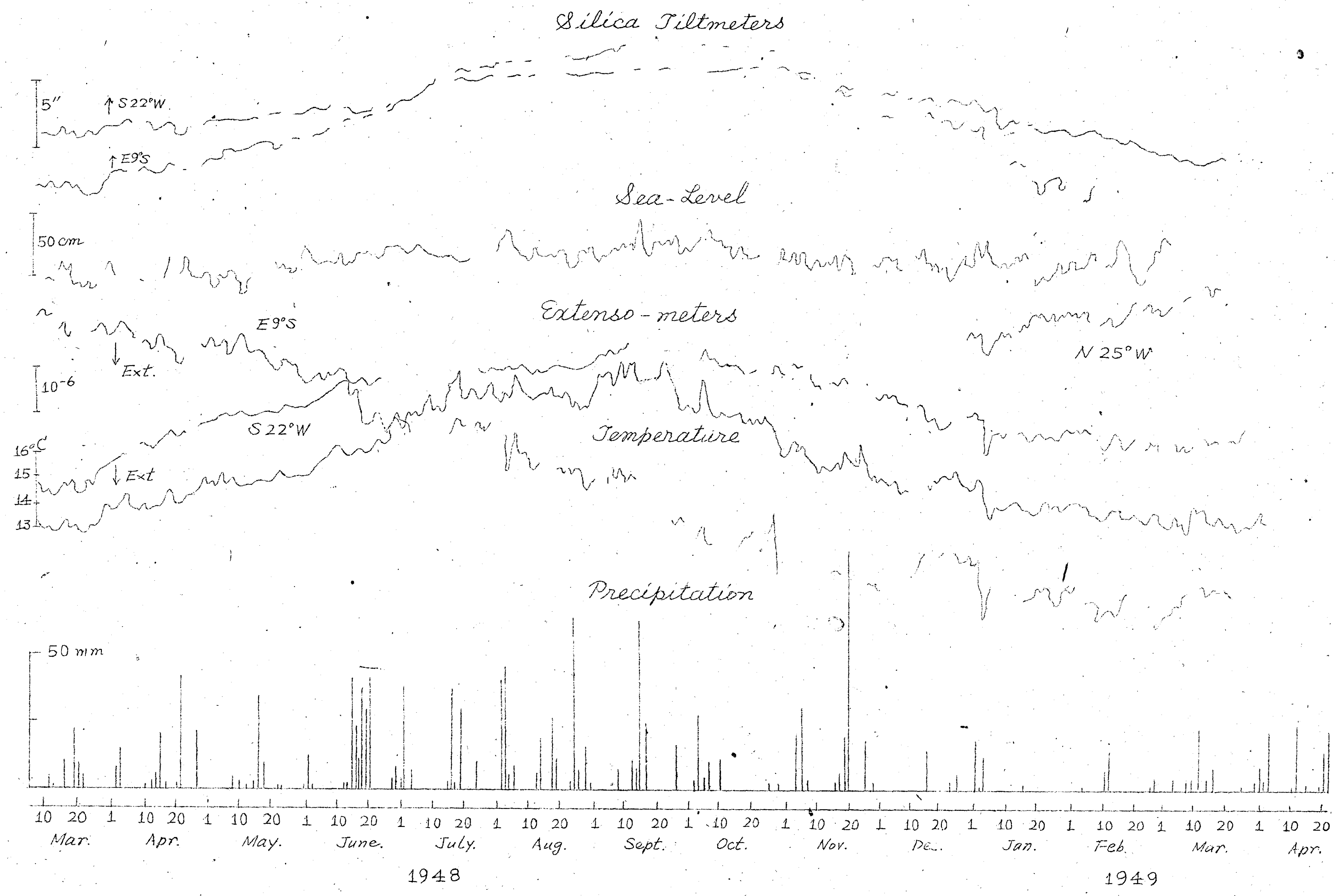
但し$\varkappa$は温度拡散率である。従って振幅比および位相差は

$$A/C = \sqrt{(\alpha^2+\beta^2)/(\gamma^2+\delta^2)}\,,\quad \tau = \tan^{-1}(\beta/\alpha) - \tan^{-1}(\gamma/\delta)$$

によって与えられる。実際にほゞ適合する場合として

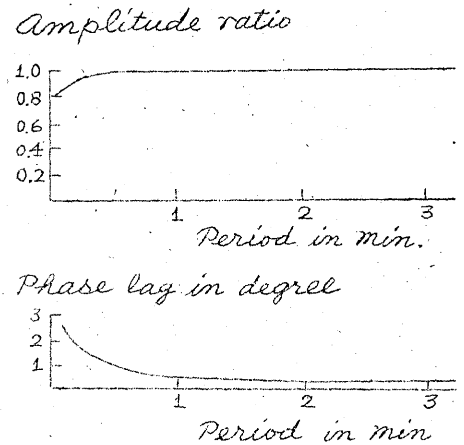
$$\varkappa = 0.01\,\mathrm{cm^2\,sec^{-1}},\quad a = 0.35\,\mathrm{cm},\quad b = 0.25\,\mathrm{cm},\quad r = 0.30\,\mathrm{cm}$$

として振幅比および位相差を計算すると第46図のようになる。図に於いて明らかであるように、現在の場合変化の速さが問題になりうるのは1分以内の早い変化であるから、日平均値を議論するにあたっては、伸縮計に対する温度変化の影響には全くおくれのないものとしてよい。

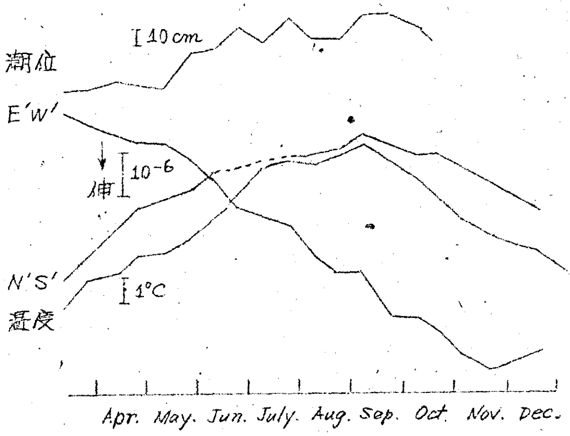

Silica Tiltmeters
5″
↑S22°W
↑E9°S
Sea-Level
50 cm
Extenso-meters
E9°S
↓Ext.
10^-6
S22°W
N25°W
Temperature
16°C
15
14
13
↓Ext
Precipitation
50 mm
10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20 1 10 20
Mar. Apr. May. June. July. Aug. Sept. Oct. Nov. De.. Jan. Feb. Mar. Apr.
1948
1949

第 45 図

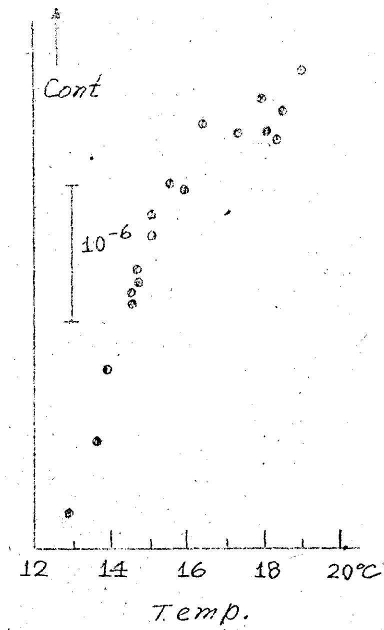
第47図は第45図を15日ずつの区間にわけてその平均についてえがいたものであるが、この15日平均値について温度対N'S'方向の伸縮の図をつくれば第48図のようになる。したがって最小自乗法によって、N'S'方向の土地の見掛けの膨張係数を求めることが出来る。同様な手続きを昭和23年3月~6月の期間および昭和23年



第46図



第47図



第48図

3月12日に行った連続観測の期間について行った結果を第V表にかかげる。参

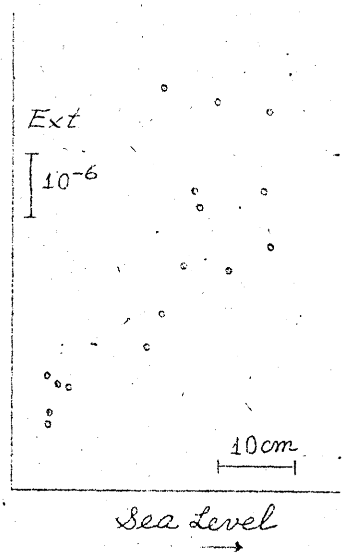
第V表 N'S'方向の土地の見掛けの膨張係数、単位 10^{-7}

全期間	3月~6月	3月12日	駒場
−4.2	−3.5	−2.9	−2.6

考のために高橋博士が駒場に於いて得た値をも記しておく。

この結果からみて、また既に述べたように、N'S'成分が潮位変化に極めて鈍感であることを考えあわせて、この1年間にN'S'成分にあらわれた変化は室温変化に伴うシリカ管および連結具の伸縮であると考えて大なる支障を来たさない。勿論その膨脹係数は通常熔融シリカのものとして知られている値に大略一致しているのである。かくして吾々はこの1年間に於いてN'S'方向には土地の伸縮は殆どないと推論しうるであろう。

第45図および第47図に於いて、次に著しいことは、N'W' 方向の伸縮計が昭和23年3～12月の期間に於て大略 6×10^{-6} の伸びを示していることである。この期間における温度上昇によるシリカ管の伸張を考慮すれば、この値はさらに大きくならなければならない。一方E'W'方向の伸縮が潮位変化に敏感であることはすでに述べたが、第45図をみると5～6日程度の短週期変動に於ては、潮位上昇及び下降に伴う土地の伸張および収縮がよくあらわれている。また15日平均値について潮位と伸縮の相関図を作ると第49図のようになり必ずしもよい相関を示さない。また昭和23年3月～6月の期間、同年3月12日の連続測定、およびさきに求めた M_2 分潮について、潮位変化による伸縮率を計算した結果は第IX表のようになり、長期変動に於いては係数が極めて大きく、この期間の温度上昇による補正を考慮するとさらにこの値は大きくなるべきである。以上の考察によりE'W'方向の大きな伸張をこの期間における潮位の上昇に直接伴う変動として解釈することは困難である。しかしながら、この変化が果して真の



第49図

E'W'方向の伸びと潮位の関係

第VI表　潮位昇降と土地伸縮（E'W'方向）との関係

3月～6月	3月12日	M_2 分潮
2.9×10^{-6}	$(1.4\pm0.1)\times10^{-6}$	0.86×10^{-6}

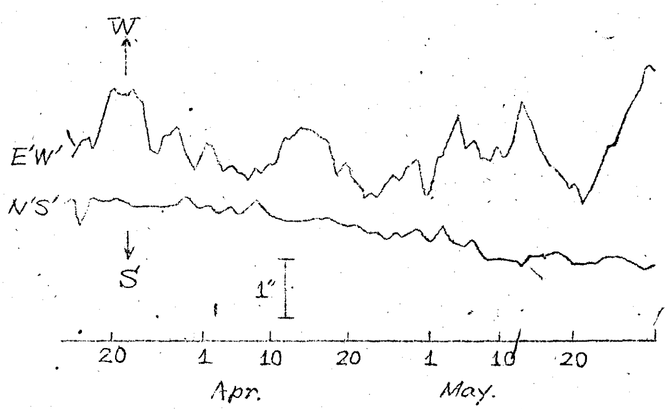
（但し潮位上昇1米についての伸張量）

土地伸張を示すか否かという点には尚吟味すべき余地があり、コンクリートブロックの安定性やこの方式による伸縮計の綜合的性能に関する検討が充分になされる迄は、一応このような変化が記録されたことを報告するにとどめたい。

昭和２３年の末期に設置された８米伸縮計、超インバール製伸縮計および垂直型伸縮計の記録した結果については、設置後日浅いために何も述べることが出来ない。

シリカ傾斜計は数秒におよぶいちじるしい年変化を示している。また温度の急変に伴う変化も処々に見られる。

水管傾斜計については、さきに述べたように白金尖端の故障のために充分な記録のえられなかつたことは真に残念である。ことに昭和２３年６月２８日の福井地震に際して総員出張観測に参加したために、測定器類の調整修理が不充分となつたので、７月以降の測定結果の信頼度は極めて悪いと思われる。第５０図に水管傾斜計が良好に作動していた時期の測定結果を示す。測定値は毎日１６時の値である。前にも述べた通り、潮汐の影響が大であって、特にE'W'成分に於いては10分の数秒に達する故、毎日の読みが



第５０図　水管傾斜計により測定した変化

多少バラつくのはやむを得ない。

以上設置以来約1年間の測定結果についてのべたが、この期間中には地球物理学的意義をもつと考えられる著るしい異常変化は見当らないようである。三浦半島附近に於て著るしい地震活動もなかつたし、他の地球物理学的現象との相関関係はさらに長期にわたる観測結果の集積をまつて議論せられねばならない。

（未　完）

Studies on the Deformation of the Earth's Surface at Aburatsubo, Miura Peninsula. (I)

By Takahiro Hagiwara,
Tsuneji Rikitake,
Juhei Yamada and
Keiichi Kasahara

(Earthquake Research Institute)

Contents

十
大
外

(to be continude)

Abstract

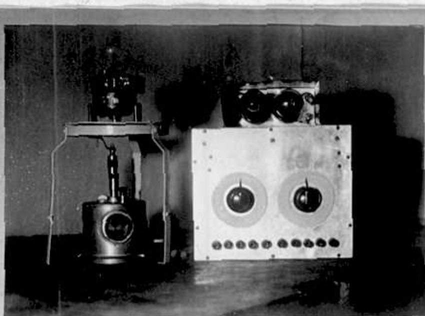
As often revealed at the time of great earthquakes, the crustal movements of the peninsulas of this country are of great interest. In order to study the character of the movement of peninsula, the writers set up varions instruments at Aburatsubo, Miura Peninsula, where the tidal recording is continud since the beginning of this century and the leveling connecting there to Fujisawa at the neck of the penisula was often repeated.

A pair of all-silica tiltmeters, water-tube tiltmeters and extensometers of varjous types are installed in a gallery in the south-east side of a hill in the site of the Marine Biological Station of the Tokyo University. Almost all the instruments are newly devised and constructed by the writers.

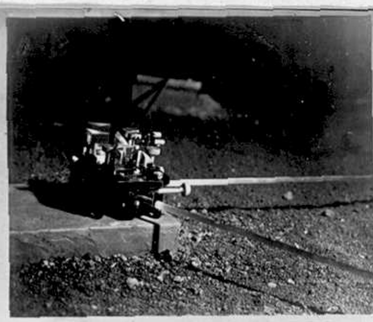
The observations began since March, 1948. The most remarkable result obtained up to this time is the fact that the deformations of the earth's surface caused by the ocean-tide are clearly recorded by the extensometers as well as by the tiltmeters. Analysing the results, we found that the deformations are so peculiar that they cannot be explained

from the stand-point of the theory of elasticity in isotropic medium.

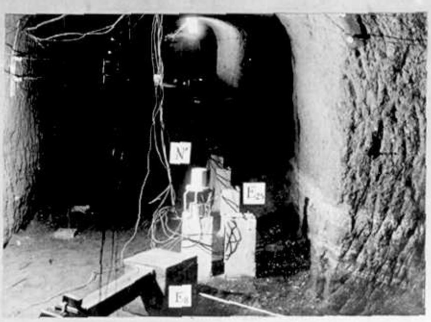
As to the variation of long period, discussions in detail will be made after making further observations.



寫眞1. 水管傾斜計遠隔測定装置

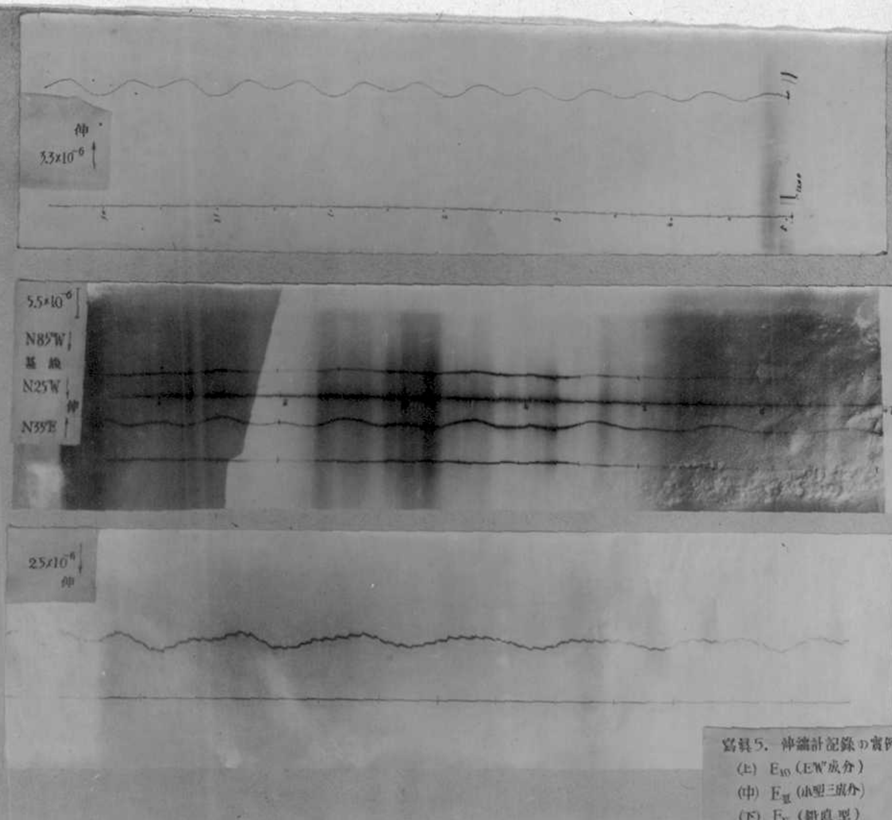


寫眞3. 小型三成分伸縮計



寫眞2. 水管傾斜計N'端及び伸縮計
E_{25}, E_8.

寫眞4. 鉛直型伸縮計



寫眞5. 伸縮計記錄の實例
(上) E_{10} (EW成分)
(中) E_{III} (小型三成分)
(下) E_V (鉛直型)
タイム・マークは12時間間隔